



# Estudo sobre viabilidade de produção descentralizada de energia à custa do efeito chaminé

IGOR AFONSO ESTEVES

Abril de 2016

# Estudo sobre viabilidade de produção descentralizada de energia à custa do efeito chaminé

Igor Afonso Esteves

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



17 de abril de 2016





Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia  
Mecânica

Candidato: Igor Afonso Esteves, 1120172, 1120172@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Engº Leonardo Ribeiro, lsr@isep.ipp.pt

Empresa:

Supervisão: Engº Leonardo Ribeiro, lsr@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica  
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



17 de abril de 2016



*Dedicado aos meus pais*





## *Agradecimentos*

A realização desta tese alicerçou-se em diversas fontes de apoio técnico e emocional e, por vezes, ambas em simultâneo.

Posto isto, deixo aqui uma palavra de especial apreço ao Professor Eng.º Leonardo Ribeiro pela disponibilidade num momento difícil, pelos conselhos, conhecimento e orientação que como poucos consegue transmitir e por conseguir sempre transparecer um sentimento de tranquilidade verdadeiramente inspirador.

Aos amigos Diogo Pinto, Sérgio Ramos, Pedro Renato e Gonçalo Maia entre outros não mencionados mas também presentes que me acolheram num meio novo de braços abertos e que, por isso, fizeram com que me sentisse em casa desde o primeiro dia.

Por fim, uma nota especial deixada à minha família que comungou da minha visão de prosseguir os estudos e me assegurou todos os recursos imprescindíveis a concluí-lo. Pais, tios, avós e namorada que é um modelo de perseverança e coragem, o meu muito obrigado.

A todos dedico este trabalho.

## *Resumo*

A procura por alternativas ao atual paradigma energético, que se caracteriza por uma predominância indiscutível das fontes combustíveis fósseis, é o motivo primário desta investigação. A energia emitida pelo Sol que chega à Terra diariamente ultrapassa em várias ordens de grandeza a energia que a nossa sociedade atual necessita.

O efeito chaminé é uma das formas de aproveitar essa energia. Este efeito tem origem no diferencial de temperaturas existente entre o interior e o exterior de uma chaminé, que provoca um gradiente nas massas volúmicas do fluido entre o interior e o exterior da chaminé, induzindo assim um fluxo de ar. Esta diferença de temperaturas radica na exposição da face exterior da chaminé à radiação solar. No sistema que nos propomos estudar, o ar entra na chaminé por pequenos orifícios situados na sua base, e, ao tomar contacto com as paredes internas da chaminé, aquece desde a temperatura ambiente,  $T_a$ , até à temperatura interna,  $T_i$ . Este aumento de temperatura torna o ar dentro da chaminé mais “leve” em comparação com o ar mais frio do exterior levando-o a ascender ao longo do interior da chaminé. Este escoamento contém energia cinética que pode, por exemplo, ser transformada em energia elétrica por intermédio de turbinas. A eficiência de conversão da energia será tanto maior quanto menor for a velocidade do ar a jusante da turbina.

Esta tecnologia poderá ser instalada de forma descentralizada, como acontece com as atuais centrais concentradoras solares térmicas e fotovoltaicas localizadas na periferia de grandes cidades ou, alternativamente, poderá ser inserida no próprio tecido urbanístico.

A investigação demonstra que as dimensões da chaminé, a irradiação e a temperatura do ar são os fatores com maior impacto na potência hidráulica gerada.

## *Palavras-Chave*

Efeito chaminé, radiação solar, convecção, algoritmo.

## *Abstract*

This investigation has its primary objective in finding alternative options to the current energy paradigm where fossil fuels are predominant. The parcel of energy emitted daily by the Sun that reaches the surface of the Earth is by many orders of magnitude greater than that required by our current society.

The so called 'stack effect' is one way of using that energy. This effect has its origin on the temperature differential that occurs between the inside and the outside of a chimney, which in turn causes a gradient on the volumetric masses of the fluid on the inside and outside of the chimney, generating an air flow. This difference in temperature is provoked by exposing the outside surface of the chimney to solar radiation. On the system we are about to study, air enters the chimney by small orifices on its base and, by direct contact with the internal wall of the chimney, warms up from ambient temperature,  $T_a$ , to the internal temperature  $T_i$ . This increase in temperature makes the air on the inside of the chimney "lighter" when compared to the air on the outside of it; this causes air to rise along the height of the chimney. This flux has its own kinetic energy that may be converted into electric energy by, for instance, turbines. The lower the velocity of the air downstream of the turbine, the higher the efficiency of the turbine will be.

This technology can be installed in a decentralized fashion, similar to the current solar thermal concentrator and PV plants located on the periphery of big cities or, in turn, inserted directly in the urban environment.

This investigation shows that the chimney dimensions, irradiation and air temperature are the factors which impact this technology the most.

### ***Keywords***

Stack effect, solar radiation, convection, algorithm.

## *Résumé:*

La recherche d'alternatives à l'actuel paradigme énergétique qui se caractérise par une prédominance indiscutable de sources d'énergie fossile est le premier motif de cette investigation.

L'effet cheminé est l'une des formes de profiter de cette énergie. Cet effet a pour origine le différentiel de températures existant entre l'intérieur et l'extérieur d'une cheminée, qui provoque un gradient dans les masses volumiques du fluide entre l'intérieur et l'extérieur de la cheminée, générant ainsi un flux d'air. De cette différence de températures résulte l'exposition de la face extérieure de la cheminée à la radiation solaire. Dans le système que nous proposons d'étudier, l'air entre dans la cheminée par de petits orifices situés à la base de celle-ci, en entrant en contact avec les murs internes de la cheminée, réchauffe non seulement la température ambiante,  $T_a$ , mais aussi la température interne  $T_i$ . Cette augmentation de la température rend l'air à l'intérieur de la cheminée plus léger comparé à l'air plus froid de l'extérieur; ceci fait monter l'air dans la cheminée. Ce flux contient de l'énergie cinétique qui peut-être transformée en énergie électrique par l'intermédiaire de turbines. L'efficacité de la conversion de l'énergie sera d'autant plus grande la vitesse de l'air en aval de la turbine sera moindre.

Cette technologie pourra être installée de manière décentralisée, comme les actuelles centrales solaires thermiques à concentration et photovoltaïques, localisées à la périphérie des grandes villes ou insérées dans le propre tissu urbain.

L'investigation montre que les dimensions de la cheminée, l'irradiation et la température de l'air sont les facteurs qui ont le plus d'impact dans cette technologie.

## *Mots-clés*

Effet cheminée, radiation solaire, convection, algorithme.



# Índice

Agradecimentos.....	viii
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
Résumé:.....	xi
Índice .....	xiii
Índice de figuras .....	xv
Simbologia .....	xviii
<b>Capítulo I.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução .....	1
1.2 Omniflow .....	2
1.3 Efeito chaminé.....	4
1.4 Estudo do impacto das dimensões da chaminé no caudal gerado.....	7
1.5 Estudo do impacto da temperatura interna $T_i$ da chaminé no caudal gerado.....	9
1.6 Estudo do impacto da temperatura do ar ambiente $T_a$ no caudal gerado .....	10
1.7 Coeficiente de Darcy, $f$ .....	11
1.7.1. Tipos de condutas .....	12
1.7.2. Cálculo do Número de Reynolds, $Re_D$ .....	12
1.7.3. Cálculo do Coeficiente de Darcy, $f$ .....	14
<b>Capítulo II.....</b>	<b>16</b>
2.1 Introdução .....	16
2.2 Descrição das potências térmicas .....	16
2.2.1. Potência térmica incidente .....	16
2.2.2. Potência térmica perdida por radiação.....	17
2.2.3. Potência térmica perdida por convecção .....	18
2.2.4. Potência térmica absorvida .....	18
2.3 Propriedades do ar.....	19
2.4 Balanço térmico.....	20
2.5 Algoritmo .....	20
2.6 Metodologia .....	22
2.7 Resultados obtidos.....	23
2.7.1. Análise às temperaturas .....	24
2.7.2. Análise às potências térmicas .....	28
2.7.3. Análise aos caudais.....	31
<b>Capítulo III.....</b>	<b>34</b>
3.1 Introdução .....	34
3.2 Dados Solares.....	34
3.2.1. Sistema de coordenadas.....	34
3.2.2. Constante Solar.....	35
3.2.3. Radiação solar .....	36
3.2.4. Radiação incidente numa superfície horizontal .....	36
3.2.5. Radiação incidente numa superfície inclinada.....	38
3.3 Potência térmica na chaminé .....	40

3.4	Resultados obtidos.....	42
3.4.1.	Análise às temperaturas .....	42
3.4.2.	Análise às potências térmicas .....	43
3.5	Potência hidráulica e caudal volúmico .....	44
<b>Capítulo IV</b>	.....	<b>47</b>
4.1	Conclusão .....	47
4.2	Melhorias sugeridas e estudos futuros .....	48
<b>Anexo A. Resultados Capítulo II</b>	.....	<b>52</b>
<b>Anexo B. Resultados Capítulo III</b>	.....	<b>56</b>
<b>Anexo C. Propriedades do ar a 1atm.....</b>		<b>58</b>
<b>Anexo D. Temperaturas médias mensais para Braga, Porto e Beja .....</b>		<b>59</b>

## *Índice de figuras*

Figura 1 Vista lateral do estator da turbina .....	3
Figura 2 Vista explodida da turbina .....	3
Figura 3 Esquema da chaminé - vista lateral.....	5
Figura 4 Representação ilustrativa do fenómeno físico do efeito chaminé.....	6
Figura 5 Variação do valor do caudal para três alturas H1, H2 e H3 com os valores de 5, 10 e 20 metros, respetivamente, para diâmetros de 0,1 a 1 metros.....	9
Figura 6 Variação do valor do caudal em função da temperatura interna.....	10
Figura 7 Variação do valor do caudal em função da temperatura ambiente média para as cidades de Braga, Porto e Beja.....	11
Figura 8 Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=14m quando exposta a uma irradiação de $170\text{W/m}^2$ em função da temperatura média mensal.....	24
Figura 9 Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=14m quando exposta a uma irradiação de $200\text{W/m}^2$ em função da temperatura média mensal.....	25
Figura 10 Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=14m quando exposta a uma irradiação de $220\text{W/m}^2$ em função da temperatura média mensal. ....	25
Figura 11 Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=20m quando exposta a uma irradiação de $170\text{W/m}^2$ em função da temperatura média mensal. ....	26
Figura 12 Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=20m quando exposta a uma irradiação de $200\text{W/m}^2$ em função da temperatura média mensal. ....	26
Figura 13 Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=20m quando exposta a uma irradiação de $220\text{W/m}^2$ em função da temperatura média mensal. ....	27
Figura 14 Potências incidente, absorvida, perdida por convecção e perdida por radiação para a chaminé H=20m quando exposta a uma irradiação de $220\text{W/m}^2$ .....	28
Figura 15 Potências absorvidas pelo ar no interior da chaminé. ....	29
Figura 16 Potências perdidas por convecção pelo exterior da chaminé. ....	30
Figura 17 Potências perdidas por radiação pelo exterior da chaminé. ....	30
Figura 18 Caudais volumétricos gerados. ....	32
Figura 19 Caudal volumétrico gerado para a chaminé de altura H=14m. ....	32
Figura 20 Sistema de coordenadas equatorial. ....	35
Figura 21 Vista de topo da chaminé ilustrativa da área da superfície exterior na qual se quantificam os ganhos por radiação direta. ....	40
Figura 22 Temperatura da parede e temperatura de saída do ar em função da temperatura média mensal e irradiação.....	43
Figura 23 Potências térmicas em função da temperatura média mensal e irradiação. ....	44



Figura 24 Potências hidráulicas em função da temperatura média mensal para chaminés de diferentes alturas. ....	45
Figura 25 Caudal volumétrico gerado em função da temperatura média mensal e irradiação....	46

## *Índice de tabelas*

Tabela 1 Condições iniciais – Estudo dimensões.....	8
Tabela 2 Condições iniciais – estudo Temperatura Interna .....	10
Tabela 3 Condições iniciais – estudo Temperatura ambiente .....	11
Tabela 4 Perfis de condutas e respectivas dimensões .....	12
Tabela 5 Velocidade de escoamento para três tipos de condutas .....	13
Tabela 6 Viscosidade cinemática para três $T_i$ à pressão atmosférica.....	13
Tabela 7 Cálculo do número de Reynolds, $Re_D$ .....	13
Tabela 8 Rugosidades típicas .....	14
Tabela 9 Coeficientes de Darcy para Aço Galvanizado.....	14
Tabela 10 Coeficientes de Darcy para Aço Comercial .....	15
Tabela 11 Coeficientes de Darcy para Ferro Fundido.....	15
Tabela 12 Condições para as iterações.....	23
Tabela 13 Temperatura média mensal do ar para a cidade do Porto.....	23
Tabela 14 Ângulo horário do pôr-do-Sol, valor médio diário da constante solar, declinação solar média mensal, índice de claridade e radiação global média diária incidente numa superfície horizontal situada na cidade do Porto. ....	37
Tabela 15 Intensidade da radiação direta, difusa e albedo sobre uma superfície inclinada $90^\circ$ em relação à horizontal situada na cidade do Porto. ....	39
Tabela 16 Intensidade da radiação direta, difusa e albedo em $W/m^2$ sobre uma superfície inclinada $90^\circ$ em relação à horizontal situada na cidade do Porto.....	39
Tabela 17 Potência proveniente de radiação direta, difusa e albedo e irradiação final incidente na chaminé .....	41
Tabela 18 Comparação de especificações de vários modelos de turbinas .....	48
Tabela 19 Variação de caudal de velocidade em função da duplicação de altura e diâmetro.....	49

## *Simbologia*

$A$	– Área [m <sup>2</sup> ]
$c_p$	– Calor específico a pressão constante [J/kg.K]
$D$	– Diâmetro [m]
$D$	–Radiação difusa [W/m <sup>2</sup> ]
$f$	– Coeficiente de Darcy [-]
$G$	–Radiação global [W/m <sup>2</sup> ]
$h$	– Coeficiente de convecção[W/m <sup>2</sup> K]
$H$	– Altura [m]
$h_e$	– Coeficiente de convecção externo [W/m <sup>2</sup> K]
$h_i$	– Coeficiente de convecção interno [W/m <sup>2</sup> K]
$H_o$	–Ângulo horário do pôr-do-Sol [m]
$I$	– Intensidade de irradiação sobre uma superfície [W/m <sup>2</sup> ]
$k$	– Condutibilidade do ar [W/mK]
$K$	– Coeficiente de perdas de carga localizadas [-]
$K_T$	–Índice de claridade [-]
$L$	–Albedo [W/m <sup>2</sup> ]
$L_c$	– Comprimento característico [m]
$\dot{m}$	– Caudal mássico [kg/s]
$n$	– Número do dia [-]
$Nu$	–Número de Nusselt [-]
$\dot{Q}_{\text{absorvida}}$	– Potência absorvida [W]
$\dot{Q}_{\text{convecção}}$	– Potência de convecção [W]
$P_a$	– Pressão atmosférica [Pa]
$Pr$	–Número de Prandtl [-]
$Re_D$	– Número de Reynolds [-]
$S$	–Radiação direta [W/m <sup>2</sup> ]
$S_{on}$	–Valor médio diário da Constante Solar [W/m <sup>2</sup> ]

$S_{oh}^d$	– Radiação solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal [W/m <sup>2</sup> ]
$t$	– Tempo [h]
$T_a$	– Temperatura do ar ambiente [K]
$T_{bh}$	– Temperatura bolbo húmido [K]
$T_{céu}$	– Temperatura do céu [K]
$T_i$	– Temperatura interna [K]
$T_p$	– Temperatura da parede [K]
$T_s$	– Temperatura de saída do ar da chaminé [K]
$v$	– Velocidade [m/s]
$V$	– Volume [m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	– Caudal volúmico [m <sup>3</sup> /s]

#### Sub-índices:

$a$	– ar ambiente
$bh$	– bolbo húmido
$céu$	– céu
$D$	– referente a radiação difusa
$e$	– externo
$i$	– interno
$L$	– referente a radiação de albedo
$n$	– perpendicular aos raios solares
$oh$	– superfície horizontal fora da superfície terrestre
$p$	– parede
$s$	– saída da chaminé
$S$	– referente a radiação direta

#### Sobre-índices:

$d$	– diário médio
$dm$	– diário médio mensal

### Constantes

$g$	– Constante de aceleração gravitacional [ $\text{m/s}^2$ ]
$\sigma$	– Constante de Stefan-Boltzmann [ $\text{W/m}^2\text{K}^4$ ]

### Símbolos gregos

$\varepsilon$	– Emissibilidade total hemisférica [-]
$\alpha$	– Coeficiente de absorção espectral hemisférico [-]
$\epsilon$	– Rugosidade [m]
$\delta$	– Declinação [ $^\circ$ ]
$\Phi$	– Latitude [ $^\circ$ ]
$\mu$	– Viscosidade dinâmica [ $\text{N.s/m}^2$ ]
$\nu$	– Viscosidade cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\rho$	– Massa volúmica [ $\text{kg/m}^3$ ]

### Siglas

IPMA	– Instituto Português do Mar e da Atmosfera
------	---



# Capítulo I

## 1.1 Introdução

Com a crescente escassez de combustíveis fósseis, dos quais a humanidade se tornou totalmente dependente, surgiu a necessidade de encontrar alternativas viáveis de produção de energia que supram as nossas necessidades. É neste quadro que se insere o aparecimento das chamadas fontes de energias renováveis, como o são a eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, hídrica entre outras, que se demarcam das restantes por explorarem recursos energéticos inesgotáveis. No entanto, existindo energia em todo o nosso redor, faz sentido estudar os fenómenos físicos por detrás destas tecnologias na perspetiva de melhorar a eficiência com que extraímos energia dos recursos mas também para alargar as formas a partir das quais o fazemos.

Sistemas como o OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) são um exemplo de uma forma de aproveitar os pequenos gradientes de temperatura que ocorrem nos oceanos, integrando-os com o ciclo de Rankine, em que a água mais quente, próxima à superfície é utilizada para evaporar o fluido frigorigéneo, expandindo-o. Esta expansão fará operar uma turbina, gerando energia elétrica. O vapor é então condensado ao ser exposto às temperaturas mais baixas características de águas mais profundas.

Com efeito, o fluxo de um fluido através de uma turbina é também a premissa base do aproveitamento hídrico e eólico. Assim, a capacidade de gerar um fluxo revela-se uma

mais-valia com potencial assinalável bem como a capacidade de o fazer em pequena e média escala na proximidade do local onde ocorrem os consumos.

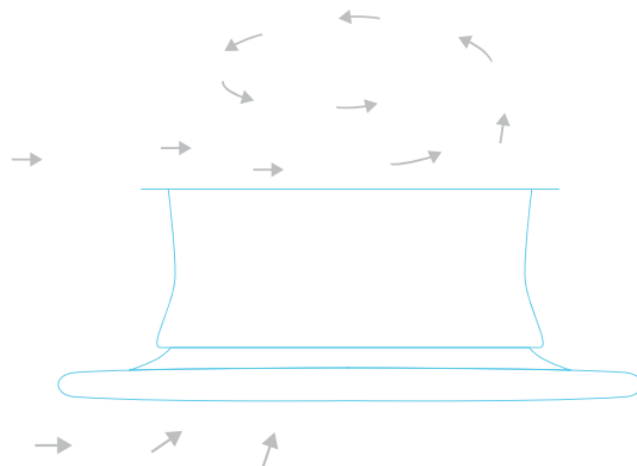
## **1.2 Omniflow**

Existe atualmente no mercado uma tecnologia que permite explorar o potencial eólico presente nas cidades apesar da sua característica turbulência provocada pelo tecido urbanístico - notoriamente desfavorável aos sistemas mais tradicionais. Vencedora da 11ª edição do concurso Prémio Jovem Empreendedor, promovido pela Associação Nacional de Jovens Empresários no ano de 2010, a Omniflow [5], empresa sediada no Porto, desenvolveu uma turbina eólica de eixo vertical que explora também a energia solar por ter incluído no seu *design* três células fotovoltaicas independentes, ver Figura 1.

A estrutura omnidirecional, isto é, igual em todas as direções perpendiculares ao eixo, permite a captação de vento independentemente da sua direção e da variação da mesma, tornando-a ideal para aproveitar os ventos erráticos e inconstantes característicos das zonas citadinas. Distingue-se também por garantir um funcionamento mais silencioso que os geradores tradicionais mantendo-se sempre abaixo dos 35dB.

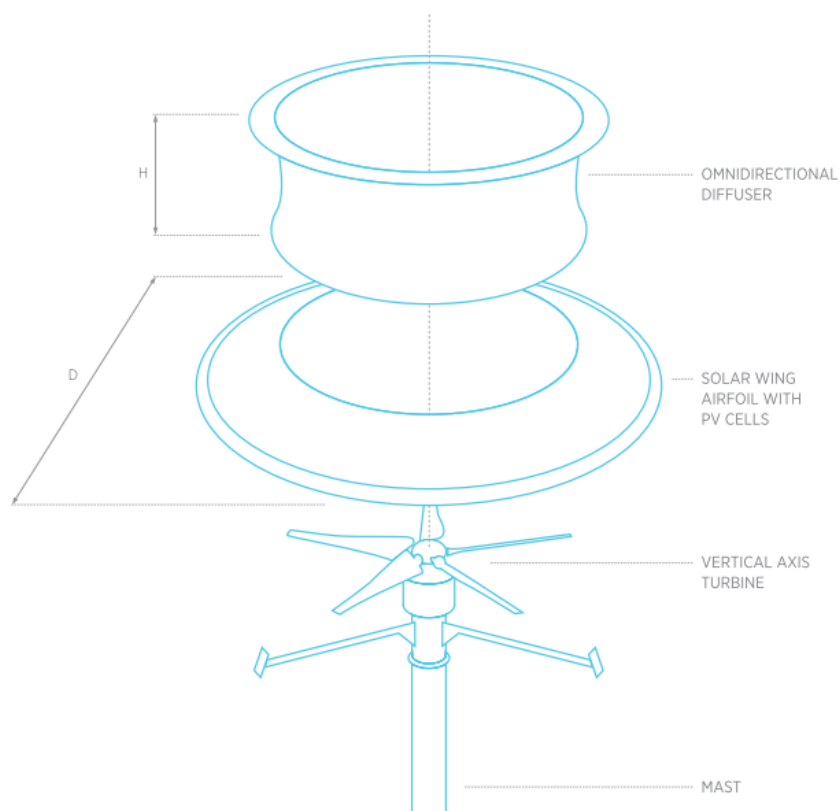
A forma de asa invertida favorece o efeito Venturi o que significa que o fluxo de ar que passa por cima, isto é, a jusante da turbina, contribui também para a operação desta pois gera um fluxo através das pás ao “aspirar” o ar que se encontra abaixo, isto é, a montante. Este princípio de funcionamento contrasta com o que sucede nas turbinas de eixo horizontal em que a componente a jusante tem uma influência mínima. O produtor afirma, inclusivamente, que o fluxo que passa acima da turbina é suficiente para iniciar a operação da mesma.





**Figura 1 Vista lateral do estator da turbina**

Esta capacidade de aproveitar os fluxos abaixo e acima do gerador é responsável pelo aumento da eficiência da turbina mas também pelas baixas velocidades de arranque que esta permite. Efetivamente, todos os modelos atualmente comercializados pela marca têm uma velocidade de arranque de 1,5m/s e começam a produzir a partir dos 3m/s.



**Figura 2 Vista explodida da turbina**

O modelo OM3.8, o maior comercializado pela empresa, tem potência pico de 3kWp proveniente da turbina eólica aos quais acresce 0,8kWp originária das células

fotovoltaicas. Este modelo tem um diâmetro,  $D$ , de 3m (com um diâmetro do rotor de 1,75m), e está assente sobre um mastro com altura de 12m, se instalado diretamente no chão, ou de 2m, se aplicado à cobertura de um edifício.

A potência pico é atingida para velocidade de vento igual ou superior a 16m/s. Acima deste valor o controlo automático de velocidade da turbina garante a integridade estrutural da mesma sem prejuízo para a produção. Uma potência debitada de 0,5kW é atingida para uma velocidade do vento ligeiramente acima dos 8m/s ao passo que 1kW ocorre para 11m/s e 2kW são conseguidos a partir de 14m/s.

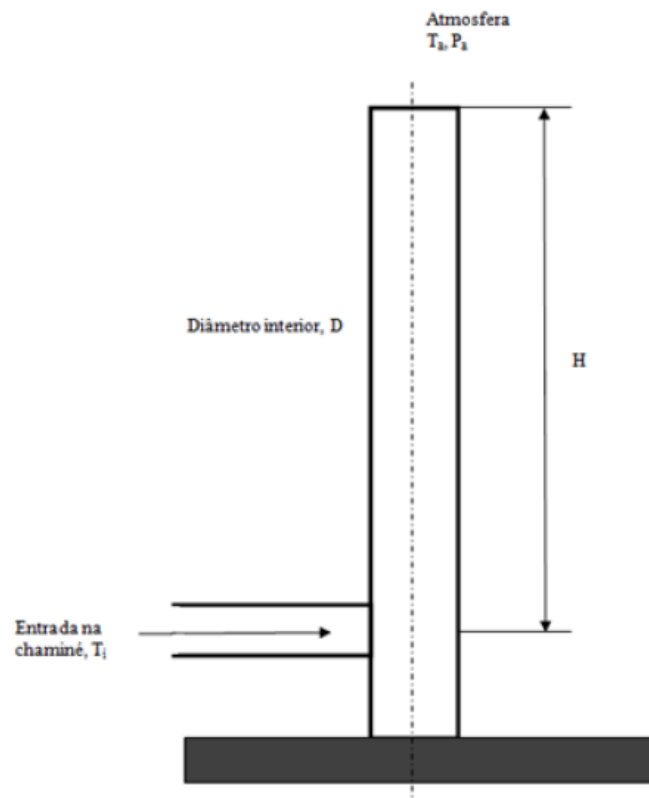
Encontrando-se na gama de microgeração, este equipamento compete diretamente com as restantes soluções já disponíveis no mercado. Neste sentido, torna-se definitivamente uma solução atrativa dado que o preço de comercialização se situa nos 11.600,00€ para o modelo MO3.8.

Está também prevista a comercialização de uma unidade de aplicação industrial com 6kWp.

### **1.3 Efeito chaminé**

O denominado "efeito chaminé" é um fenómeno que tem como produto o escoamento de um fluido. Este fenómeno tem origem no diferencial de temperaturas existente entre o interior e o exterior de uma coluna oca – a chaminé. Este diferencial térmico induz um gradiente nas massas volúmicas do fluido entre o interior e o exterior da chaminé, provocando a ascensão do ar no interior da chaminé.

No sistema que nos propomos estudar, essa diferença nas temperaturas será provocada pela exposição da face exterior da chaminé à radiação solar. Esta será, em parte, absorvida, sendo o restante perdido por convecção e radiação para a atmosfera. O calor absorvido é transferido em primeira instância por condução cilíndrica, através da parede da chaminé e, por fim, por convecção entre a parede interna da chaminé e o fluido que escoar no seu interior.



**Figura 3 Esquema da chaminé - vista lateral**

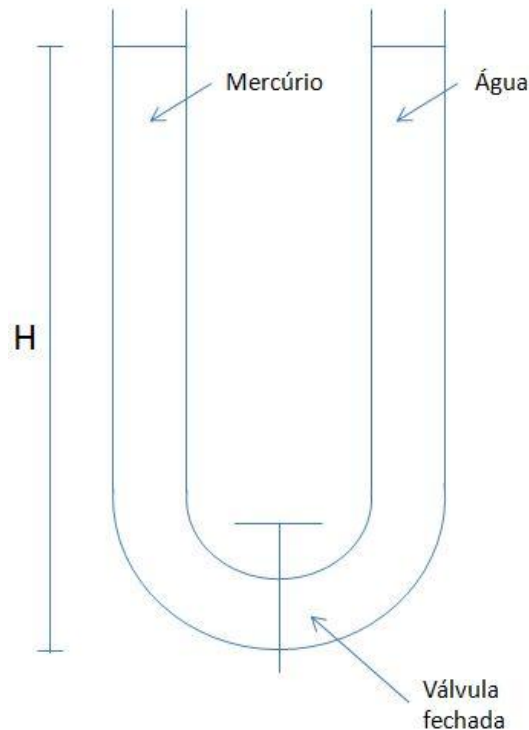
Neste sistema, o ar entra na chaminé através de pequenos orifícios situados na sua base inferior, e, ao entrar em contacto com as paredes internas da chaminé, passa da temperatura ambiente,  $T_a$ , em que se encontra no estado inicial, para a temperatura interna,  $T_i$ , sua temperatura final. Sendo  $T_i$  maior que  $T_a$  devido à exposição solar, este aumento de temperatura do fluído traduzir-se-á num decréscimo da sua massa volúmica, tornando-o mais “leve” dentro da chaminé e levando-o, por conseguinte, a ascender pela chaminé ao longo da sua altura  $H$  onde acaba por sair pelo topo, altura em que ficará novamente sujeito apenas à pressão atmosférica  $P_a$ . Ao ascender, a massa de ar provoca uma ligeira depressão na base da chaminé forçando a entrada de mais ar do exterior, repetindo o ciclo.

Pode pensar-se neste sistema como um tubo de ensaio em forma de U, de altura  $H$  em que, no estado inicial, o fluído na metade esquerda - mercúrio - e o fluído na metade direita - água - se encontram hidraulicamente separados por uma válvula fechada.

A pressão exercida na face esquerda da válvula, isto é, no lado do mercúrio, corresponde à soma da pressão atmosférica exercida na camada de mercúrio em

contacto com o ar (no topo do tudo de ensaio) com a pressão exercida pelo peso do próprio fluído. Ou seja:

$$P_{Válvula} = P_{atm} + \rho_{mercúrio}gH \quad (1)$$



**Figura 4 Representação ilustrativa do fenómeno físico do efeito chaminé.**

Ao abrir a válvula, o mercúrio, por ser o mais denso dos dois fluidos, "empurra" a água em proporção direta à diferença de massas volúmicas dos dois.

$$\Delta P = (\rho_{mercúrio} - \rho_{água})gH \quad (2)$$

Se substituirmos o mercúrio por ar frio e a água por ar quente, obtém-se o mesmo fenómeno que ocorre na chaminé. Desta feita, a diferença de pressões entre o interior e exterior da chaminé (variável que, no exemplo anterior, é interpretada pela válvula), corresponde a:

$$\Delta P = (\rho_{ar\ frio} - \rho_{ar\ quente})gH \quad (3)$$

Esta equação atinge o equilíbrio quando o deslocamento provocado pela diferença de massas volúmicas dos fluidos for igual à perda de carga provocada pelo próprio escoamento do fluido. O mesmo é dizer que o fluído mais denso empurra o fluído mais

"leve" até a energia dissipada devido à viscosidade e atrito do fluído mais leve igualarem esta força de deslocamento.

$$\Delta P = \rho g \left( f \frac{H}{D} + \sum K_i \right) \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

O fluxo gerado contém energia cinética que pode eventualmente ser convertida por intermédio de turbinas. A eficiência da conversão de energia será tanto maior quanto menor for a velocidade do ar a jusante da turbina. Teoricamente, a velocidade ideal neste ponto seria zero o que significaria que toda a energia associada ao movimento da massa de ar gerado pela chaminé teria sido utilizado para fazer girar a turbina; na prática isso é, obviamente, impossível e seria inviável visto que tem que haver escoamento de ar na chaminé para o sistema funcionar.

Esta tecnologia poderá, à partida, ser instalada de forma descentralizada em grande escala, isto é, à imagem das atuais centrais concentradoras solares térmicas e fotovoltaicas localizadas na periferia de grandes cidades ou inserida no próprio tecido urbanístico como por exemplo em cantos e telhados de edifícios atendendo, obviamente, ao *design* e função do mesmo.

#### **1.4 Estudo do impacto das dimensões da chaminé no caudal gerado**

Sabendo que o efeito chaminé tem, em última análise, origem na diferença de temperaturas do ar no seu interior e exterior e que estas variáveis estão intimamente relacionadas com as dimensões da chaminé, é imperativo perceber qual o efeito que as dimensões da chaminé desempenha no caudal gerado.

Como foi descrito no subcapítulo 1.3, ao segmento de coluna de ar exterior desde o topo até ao fundo da chaminé corresponde o acréscimo de pressão  $\rho_a g H$ ; ao segmento de coluna de ar interior desde o topo até ao fundo da chaminé corresponde o acréscimo de pressão  $\rho_i g H$ . Como  $\rho_a g H > \rho_i g H$  (ar exterior é mais frio que o interior, logo mais "pesado"), haverá escoamento dentro da chaminé impulsionado por  $(\rho_a - \rho_i) g H$ , e este diferencial de pressões igualará a perda de pressão do escoamento dentro da chaminé.

O coeficiente de Darcy é dado por  $f$  e  $K_i$  é o coeficiente de perdas de carga localizadas para dado componente  $i$ .

$$(\rho_a - \rho_i)gH = \frac{1}{2}v^2\rho_i\left(f\frac{H}{D} + \sum K_i\right) \quad (5)$$

Evidenciando a velocidade  $v$ ,

$$v = \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_i)gH}{\rho_i\left(f\frac{H}{D} + \sum K_i\right)}} \quad (6)$$

e sabendo que

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (7)$$

tem-se que o caudal é dado por

$$\dot{V} = A \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_i)gH}{\rho_i\left(f\frac{H}{D} + \sum K_i\right)}} \quad (8)$$

Assim, foi possível calcular de que forma o caudal varia em função da altura,  $H$ , e do diâmetro da chaminé,  $D$ . Para proceder a esse estudo, assumiram-se os dados apresentados na Tabela 1.

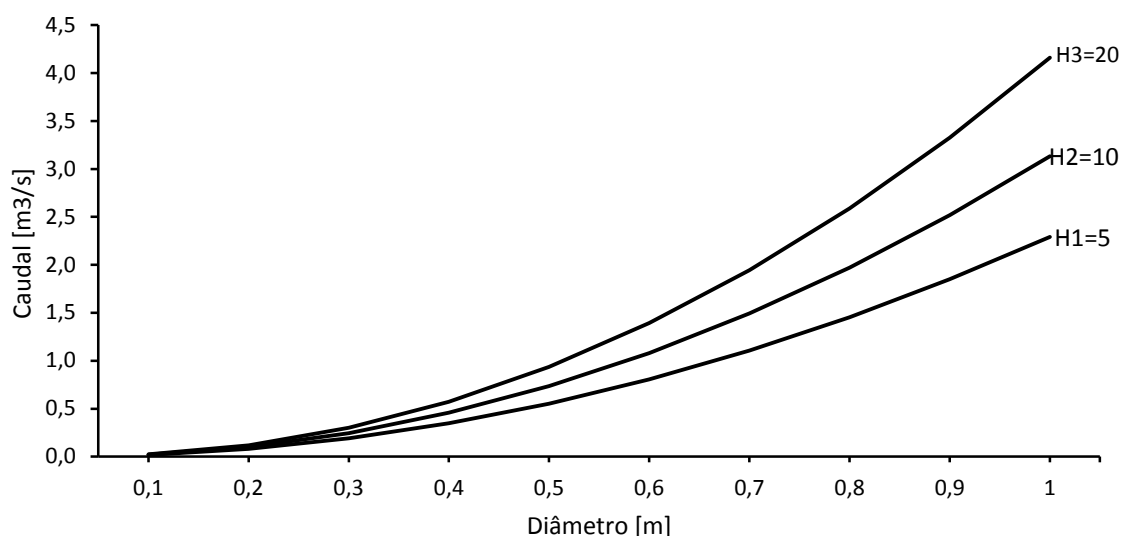
**Tabela 1 Condições iniciais – Estudo dimensões**

Dados		
Variável	Valor	Unidades
<b>T<sub>a</sub></b>	15	[°C]
<b>T<sub>i</sub></b>	50	[°C]
<b>f</b>	0,02	[-]
<b>ΣK<sub>i</sub></b>	1,3	[-]
<b>ρ<sub>a</sub></b>	1,225	[kg/m <sup>3</sup> ]
<b>ρ<sub>i</sub></b>	1,093	[kg/m <sup>3</sup> ]

A massa volúmica do ar foi determinada segundo a lei dos gases perfeitos, (9), em que  $T$  representa a temperatura do ar em *Kelvin*.

$$\rho = \frac{P_a}{R_{ar}T} = \frac{101325}{287T} \quad (9)$$

Obtiveram-se assim os caudais visíveis na Figura 5.



**Figura 5** Variação do valor do caudal para três alturas H1, H2 e H3 com os valores de 5, 10 e 20 metros, respectivamente, para diâmetros de 0,1 a 1 metros.

As alturas seleccionadas procuram enquadrar-se nas cotas utilizadas nas construções habitacionais modernas possibilitando a utilização de chaminés em, por exemplo, cantos exteriores de edifícios.

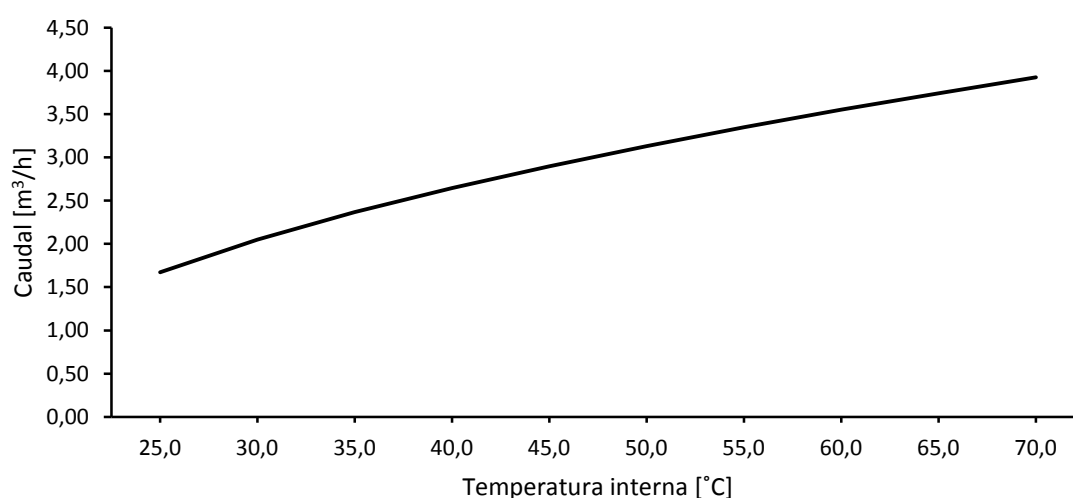
Conclui-se portanto que, para um diâmetro de 1m e para uma altura de 5m, se prevê um caudal de aproximadamente  $2,3\text{m}^3/\text{s}$  ao passo que para uma altura de 10 metros este valor ascende aos  $3,13\text{m}^3/\text{s}$ .

### **1.5 Estudo do impacto da temperatura interna $T_i$ da chaminé no caudal gerado**

Estando o valor do caudal também dependente da massa volúmica que, por sua vez, depende diretamente da temperatura (de acordo a equação dos gases perfeitos), e tendo como ponto de partida as condições apresentadas na Tabela 2, pode verificar-se na Figura 6 a variação do valor do caudal em função da temperatura do ar no interior da chaminé.

**Tabela 2 Condições iniciais – estudo Temperatura Interna**

<b>Dados</b>		
<b>Variável</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>T<sub>a</sub></b>	15	[°C]
<b>f</b>	0,02	[-]
<b>ΣK<sub>i</sub></b>	1,3	[-]
<b>ρ<sub>a</sub></b>	1,225	[kg/m <sup>3</sup> ]
<b>H</b>	10	[m]
<b>D</b>	1	[m]



**Figura 6 Variação do valor do caudal em função da temperatura interna.**

Verifica-se uma evolução quase linear do caudal em função da temperatura do ar no interior da chaminé. Com efeito, para uma  $T_i$  de 25°C é gerado um caudal de 1,17m<sup>3</sup>/s ao passo que para uma  $T_i$  de 65°C o caudal gerado já se situa nos 3,52m<sup>3</sup>/s.

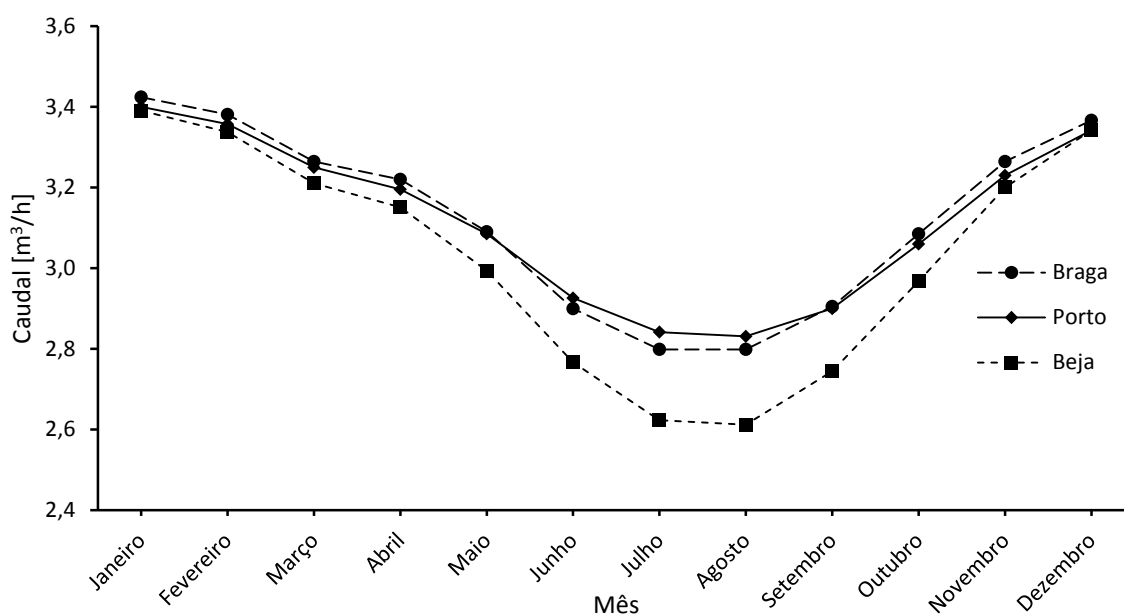
## 1.6 Estudo do impacto da temperatura do ar ambiente $T_a$ no caudal gerado

Sendo  $T_i$  uma variável com um impacto tão significativo, é expectável que  $T_a$  também o seja pelo que interessa verificar de que forma o clima presente em Portugal Continental pode influir nos caudais esperados. Para tal, recorrendo a dados disponibilizados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, procedeu-se ao cálculo do caudal segundo os dados apresentados na Tabela 3 e assumindo que  $T_a$  corresponde à média das temperaturas médias mensais verificadas entre 1981 e 2010 para três cidades distintas: Braga, Porto e Beja, Figura 7.



**Tabela 3 Condições iniciais – estudo Temperatura ambiente**

Dados		
Variável	Valor	Unidades
$T_i$	50	[°C]
$f$	0,02	[-]
$\Sigma K_i$	1,3	[-]
$\rho_i$	1,093	[kg/m³]
$H$	10	[m]
$D$	1	[m]



**Figura 7 Variação do valor do caudal em função da temperatura ambiente média para as cidades de Braga, Porto e Beja.**

Como esperado, as curvas do caudal gerado ao longo do ano apresentam um perfil sinusoidal que se coaduna com o perfil sinusoidal das temperaturas ambiente médias verificadas ao longo do ano. Com a subida de  $T_a$  nos meses de verão, a massa volúmica do ar no exterior da chaminé diminui aproximando-se da massa volúmica do ar no interior da mesma. Assim, o fator  $\rho_a - \rho_i$  decresce e, com este, o caudal gerado. As temperaturas  $T_a$  podem ser consultadas no Anexo D.

## 1.7 Coeficiente de Darcy, $f$

O coeficiente de Darcy,  $f$ , é o fator de fricção adimensional que traduz a influência que a rugosidade e diâmetro da conduta, velocidade, viscosidade e massa volúmica do fluido

têm na perda de carga em linha do escoamento. A relação seguinte verifica-se, para escoamentos turbulentos e tubos rugosos, segundo (10).

$$f = \left( 1,8 \log_{10} \left[ \frac{6,9}{Re_D} + \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right] \right)^{-2} \quad (10)$$

### 1.7.1. Tipos de condutas

Assumiram-se três tipos de condutas: circular, quadrada e retangular. Estes perfis foram escolhidos pela sua fácil aplicabilidade em situações de construção e pela abundância no mercado.

Os cálculos efetuados partiram das dimensões apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 Perfis de condutas e respetivas dimensões**

Conduta				Área [m²]
Circular	Diâmetro [m]			0,785
	1			
Quadrada	Lado [m]	Diâmetro Hidráulico [m]		4,000
	2	2		
Retangular	Lado 1 [m]	Lado 2 [m]	Diâmetro Hidráulico [m]	2,000
	1	2	1,33	

### 1.7.2. Cálculo do Número de Reynolds, $Re_D$

A fim de se avaliar se o escoamento é de facto turbulento, procedeu-se ao cálculo do número de Reynolds,  $Re_D$ , de acordo com (11) onde  $\nu$  representa a viscosidade cinemática do fluido.

$$Re_D = \frac{vD}{\nu} \quad (11)$$

Partindo dos dados da tabela 4, em particular a área da secção da conduta, calcularam-se as velocidades presentes nas condutas segundo a equação (5) para uma gama de caudais de 1 a 3,5m<sup>3</sup>/s, como apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 Velocidade de escoamento para três tipos de condutas**

Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Velocidade [m/s]		
	Circular	Quadrada	Retangular
1,00	1,273	0,250	0,500
1,50	1,910	0,375	0,750
2,00	2,546	0,500	1,000
2,50	3,183	0,625	1,250
3,00	3,820	0,750	1,500
3,50	4,456	0,875	1,750

As viscosidades cinemáticas para as diversas temperaturas foram retiradas das tabelas das propriedades termodinâmicas do ar para a pressão atmosférica segundo Turns(2000) [3] e encontram-se na Tabela 6 (Anexo C).

**Tabela 6 Viscosidade cinemática para três T<sub>i</sub> à pressão atmosférica**

T <sub>i</sub> [°C]	Viscosidade cinemática $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]
30	1,63×10 <sup>-5</sup>
50	1,82×10 <sup>-5</sup>
70	2,03×10 <sup>-5</sup>

Sendo  $Re_D$  calculado sobre o diâmetro, é necessário converter as dimensões das condutas não circulares em diâmetros hidráulicos. Isto é conseguido aplicando (12) onde  $P_{molhado}$  representa o perímetro molhado.

$$D_{hidráulico} = \frac{4A}{P_{molhado}} \quad (12)$$

Com isto, é possível por fim calcular  $Re_D$ .

**Tabela 7 Cálculo do número de Reynolds, ReD**

Re <sub>D</sub>								
T <sub>i</sub> = 30°C			T <sub>i</sub> = 50°C			T <sub>i</sub> = 70°C		
Circ.	Quad.	Retan.	Circ.	Quad.	Retan.	Circ.	Quad.	Retan.
7,82×10 <sup>4</sup>	3,07×10 <sup>4</sup>	4,10×10 <sup>4</sup>	6,98×10 <sup>4</sup>	2,74×10 <sup>4</sup>	3,65×10 <sup>4</sup>	6,28×10 <sup>4</sup>	2,47×10 <sup>4</sup>	3,29×10 <sup>4</sup>
1,17×10 <sup>5</sup>	4,61×10 <sup>4</sup>	6,14×10 <sup>4</sup>	1,05×10 <sup>5</sup>	4,11×10 <sup>4</sup>	5,48×10 <sup>4</sup>	9,42×10 <sup>4</sup>	3,70×10 <sup>4</sup>	4,93×10 <sup>4</sup>
1,56×10 <sup>5</sup>	6,14×10 <sup>4</sup>	8,19×10 <sup>4</sup>	1,40×10 <sup>5</sup>	5,48×10 <sup>4</sup>	7,31×10 <sup>4</sup>	1,26×10 <sup>5</sup>	4,93×10 <sup>4</sup>	6,58×10 <sup>4</sup>
1,96×10 <sup>5</sup>	7,68×10 <sup>4</sup>	1,02×10 <sup>5</sup>	1,74×10 <sup>5</sup>	6,85×10 <sup>4</sup>	9,13×10 <sup>4</sup>	1,57×10 <sup>5</sup>	6,17×10 <sup>4</sup>	8,22×10 <sup>4</sup>
2,35×10 <sup>5</sup>	9,22×10 <sup>4</sup>	1,23×10 <sup>5</sup>	2,09×10 <sup>5</sup>	8,22×10 <sup>4</sup>	1,10×10 <sup>5</sup>	1,88×10 <sup>5</sup>	7,40×10 <sup>4</sup>	9,86×10 <sup>4</sup>
2,74×10 <sup>5</sup>	1,08×10 <sup>5</sup>	1,43×10 <sup>5</sup>	2,44×10 <sup>5</sup>	9,59×10 <sup>4</sup>	1,28×10 <sup>5</sup>	2,20×10 <sup>5</sup>	8,63×10 <sup>4</sup>	1,15×10 <sup>5</sup>

É facilmente verificável que, para todas as tipologias de conduta e para as várias  $T_i$ , se conseguem  $Re_D$  muito acima de 2300, confirmando o regime turbulento do escoamento para as situações de interesse.

### 1.7.3. Cálculo do Coeficiente de Darcy, $f$

Foram selecionados três materiais distintos para a chaminé para se obter maior representatividade de resultados. Para isso, foram escolhidos o aço galvanizado, aço comercial e o ferro fundido pela segurança estrutural que garantem e pela abundante existência no mercado. As rugosidades típicas destes materiais encontram-se na Tabela 8.

**Tabela 8 Rugosidades típicas**

<b>Material</b>	<b><math>\epsilon</math> Rugosidade [m]</b>
Aço Galvanizado	$1,50 \times 10^{-4}$
Aço Comercial	$4,60 \times 10^{-5}$
Ferro Fundido	$1,50 \times 10^{-4}$

Assim, obtiveram-se os seguintes coeficientes de Darcy, com a correlação (10) e os valores de Reynolds da Tabela 7 (ver Tabela 9 Tabela 10 e Tabela 11).

**Tabela 9 Coeficientes de Darcy para Aço Galvanizado**

<b>Coeficiente de Darcy - <math>f</math> - Aço Galvanizado</b>								
<b><math>T_i = 30^\circ\text{C}</math></b>			<b><math>T_i = 50^\circ\text{C}</math></b>			<b><math>T_i = 70^\circ\text{C}</math></b>		
<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>	<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>	<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>
0,0194	0,0233	0,0220	0,0198	0,0240	0,0225	0,0202	0,0246	0,0231
0,0180	0,0213	0,0202	0,0184	0,0218	0,0206	0,0187	0,0224	0,0211
0,0172	0,0200	0,0190	0,0175	0,0205	0,0195	0,0178	0,0210	0,0199
0,0166	0,0191	0,0182	0,0169	0,0196	0,0186	0,0172	0,0200	0,0190
0,0162	0,0184	0,0177	0,0164	0,0189	0,0180	0,0167	0,0193	0,0184
0,0158	0,0179	0,0172	0,0161	0,0183	0,0175	0,0163	0,0187	0,0179

**Tabela 10 Coeficientes de Darcy para Aço Comercial**

<b>Coeficiente de Darcy - <math>f</math> - Aço Comercial</b>								
<b>T<sub>i</sub> = 30°C</b>			<b>T<sub>i</sub> = 50°C</b>			<b>T<sub>i</sub> = 70°C</b>		
<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>	<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>	<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>
0,0189	0,0232	0,0218	0,0194	0,0239	0,0223	0,0198	0,0245	0,0229
0,0175	0,0212	0,0199	0,0179	0,0217	0,0204	0,0182	0,0222	0,0209
0,0165	0,0198	0,0187	0,0169	0,0204	0,0192	0,0172	0,0208	0,0196
0,0159	0,0189	0,0179	0,0162	0,0194	0,0183	0,0164	0,0198	0,0187
0,0154	0,0182	0,0172	0,0157	0,0187	0,0176	0,0159	0,0191	0,0180
0,0150	0,0177	0,0167	0,0153	0,0181	0,0171	0,0155	0,0185	0,0175

**Tabela 11 Coeficientes de Darcy para Ferro Fundido**

<b>Coeficiente de Darcy - <math>f</math> - Ferro Fundido</b>								
<b>T<sub>i</sub> = 30°C</b>			<b>T<sub>i</sub> = 50°C</b>			<b>T<sub>i</sub> = 70°C</b>		
<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>	<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>	<b>Circ.</b>	<b>Quad.</b>	<b>Retan.</b>
0,0194	0,0233	0,0220	0,0198	0,0240	0,0225	0,0202	0,0246	0,0231
0,0180	0,0213	0,0202	0,0184	0,0218	0,0206	0,0187	0,0224	0,0211
0,0172	0,0200	0,0190	0,0175	0,0205	0,0195	0,0178	0,0210	0,0199
0,0166	0,0191	0,0182	0,0169	0,0196	0,0186	0,0172	0,0200	0,0190
0,0162	0,0184	0,0177	0,0164	0,0189	0,0180	0,0167	0,0193	0,0184
0,0158	0,0179	0,0172	0,0161	0,0183	0,0175	0,0163	0,0187	0,0179

Verifica-se, portanto, que o valor para o coeficiente de Darcy,  $f$ , de 0,02 assumido nos estudos anteriores (Tabela 2 e Tabela 3) constitui uma estimativa adequada pois representa aquilo que é, em média, o fator de fricção esperado para os diversos materiais e condições de escoamento previstas.

# Capítulo II

## 2.1 Introdução

No sistema em estudo existe inter-relação subjacente às temperaturas características dos diversos pontos e as energias incidente, refletida e absorvida, também características do sistema; essa inter-relação influenciará o caudal de ar gerado dentro da chaminé. O seu efeito será abordado ao longo deste capítulo com o intuito de perceber quais os mecanismos que mais influenciam o efeito chaminé; é ainda elaborado um balanço energético à chaminé.

## 2.2 Descrição das potências térmicas

O efeito chaminé tem por base o equilíbrio das potências térmicas afetas ao sistema, sendo elas: potência térmica incidente (sob a forma de irradiação), potência térmica perdida por radiação e por convecção pela face exterior da chaminé e a potência térmica absorvida pelo ar.

### 2.2.1. Potência térmica incidente

A potência térmica solar que incide na chaminé é dada pela expressão

$$\dot{Q}_{incidente} = \alpha I A \quad (13)$$

$I$ , traduz a irradiação solar em unidades de  $\text{W/m}^2$  e é a pedra basilar do efeito chaminé uma vez que é daqui que vem a potência absorvida que é o “combustível” que alimenta o processo. A irradiação é constituída por três componentes: direta, difusa e albedo. A intensidade de cada um destes componentes depende das condições meteorológicas, principalmente da nebulosidade. Para os cálculos imediatos adotar-se-á  $I = 200 \text{W/m}^2$ , que é um valor plausível para a irradiação solar; posteriormente confirmar-se-á esse valor com cálculos rigorosos da irradiação solar.

Por seu lado,  $\alpha$ , o coeficiente de absorção espectral hemisférico da face exterior da chaminé deve ser o mais próximo possível de 1 para comprimentos de onda da radiação solar, que são superiores a  $0,3 \mu\text{m}$ . Assumiu-se  $\alpha = 0,96$ , que é um valor normal para superfícies absorvedoras de coletores solares, nomeadamente com cobertura de *lampblack in epoxy* sugerida por Duffie et Beckam(1991) [1].

A área da superfície absorvedora é dada por  $A$  com unidades de  $\text{m}^2$ .

### 2.2.2. Potência térmica perdida por radiação

A potência perdida por radiação pela superfície exterior da chaminé para o céu é calculada segundo

$$\dot{Q}_{\text{radiação}} = \varepsilon A \sigma (T_p^4 - T_{\text{céu}}^4) \quad (14)$$

Dado que se trata de uma perda, é desejável que esta componente tenha o menor valor possível. A forma de o conseguir passa maioritariamente por tentar garantir que  $\varepsilon$ , a emissibilidade total hemisférica da face exterior da chaminé, seja tão baixa quanto possível. Assumiu-se neste estudo o valor de 0,1, que é um valor normal para superfícies absorvedoras de coletores solares.

Para além da área da face exterior da chaminé e da constante de Stefan-Boltzmann, a potência perdida por radiação é também proporcional à diferença da quarta potência das temperaturas da referida face e do céu. A temperatura de parede da face exterior da chaminé é uma das variáveis que serão calculadas. A temperatura do céu calculada de acordo com (15), está diretamente dependente da humidade do ar mediante as temperaturas de bolbo seco e de bolbo húmido do ar atmosférico; assumiu-se  $T_{\text{céu}} = 260,044 \text{K}$ , correspondente a temperaturas de bolbo seco e bolbo húmido do ar atmosférico iguais a  $9,5^\circ\text{C}$  e  $3,1^\circ\text{C}$  respetivamente, que são valores habituais e para as 12h. As temperaturas  $T_{\text{céu}}$  e  $T_{\text{ar}}$  são ambas expressas em Kelvin.

$$T_{céu} = T_{ar}[0,711 + 0,0056T_{bh} + 0,000073T_{bh}^2 + 0,013\cos(15t)]^{1/4} \quad (15)$$

### 2.2.3. Potência térmica perdida por convecção

A potência perdida por convecção pela superfície exterior da chaminé para o ar ambiente é dada por

$$\dot{Q}_{convecção} = h_e A (T_p - T_a) \quad (16)$$

Esta potência é também uma perda pelo que, tal como acontece com a potência perdida por radiação, quer-se mitigada. Como a própria equação indica, é proporcional à diferença entre as temperaturas da parede e do ar atmosférico bem como à área da superfície exterior da chaminé.

A chaminé está exposta ao exterior; há na superfície exterior da chaminé uma mistura de convecção natural e de convecção forçada entre a superfície exterior da chaminé e o ar ambiente; nestas condições o coeficiente de convecção global é dado por (17) segundo é recomendado por McAdams (1954)[2], em que  $L_c$  é um comprimento característico dado por (18).

$$h_e = \frac{8,6v^{0,6}}{L_c^{0,4}} \quad (17)$$

$$L_c = \sqrt[3]{V_{chaminé}} = \sqrt[3]{\pi H \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (18)$$

Note-se que a equação anterior só é correta se a chaminé estiver isolada; se estiver integrada num canto de um edifício, então o volume  $V$  deve ser o do edifício.

Nos cálculos subsequentes assumir-se-á, como é plausível para condições atmosféricas prevalecentes na cidade do Porto, que a velocidade do vento ronda 1 km/h ou 0,2778 m/s.

### 2.2.4. Potência térmica absorvida

A potência absorvida pelo escoamento de ar que ascende no interior da chaminé pode ser calculada por

$$\dot{Q}_{absorvida} = \dot{m} c_p (T_s - T_a) \quad (19)$$



Onde  $T_s$  representa a temperatura de saída do ar pelo topo da chaminé,  $c_p$  traduz o calor específico do ar a pressão constante, depende da temperatura mediante a correlação seguinte. A temperatura  $T$  é expressa em Kelvin.

$$c_p(T) = 1030,5 - 0,19975T + 3,9734 \times 10^{-4}T^2 \quad (20)$$

Tanto o  $c_p$  como o caudal do escoamento de ar dentro da chaminé, como visto no capítulo 1.5, variam muito ligeiramente com a temperatura pelo que se conclui que a potência absorvida por esse escoamento depende sobretudo de  $T_s - T_a$ .

A potência absorvida pelo escoamento de ar que ascende no interior da chaminé pode ainda ser contabilizada pelo efeito de convecção entre a face interior da chaminé e o dito escoamento, e que é expressa segundo

$$\dot{Q}_{convecção} = h_i A (T_p - T_m) \quad (21)$$

De acordo com o requerido pela correlação de Nusselt usada para o escoamento de ar no interior da chaminé, as propriedades desse escoamento foram calculadas para a temperatura média dada por  $T_m$ . Lembra-se que  $T_s$  corresponde à temperatura de saída do ar da chaminé e  $T_a$  à temperatura do ar exterior, também descrita como a temperatura de entrada do ar na chaminé.

$$T_m = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (22)$$

### 2.3 Propriedades do ar

O ar exterior, tal como mencionado no capítulo 1.6, tem as temperaturas médias mensais para a cidade do Porto. A temperatura do escoamento de ar no interior da chaminé será  $T_m$ , pela equação (22).

Seguem-se as propriedades termofísicas usadas para o escoamento de ar no interior da chaminé e respetivas correlações de cálculo:

- Condutibilidade do ar,  $k$ , segundo McQuillan, Culham, Yovanovich (1984)[4]

$$k(T) = \frac{2,3340 \times 10^{-3} T^{3/2}}{164,54 + T} \quad (23)$$

- Viscosidade dinâmica do ar,  $\mu$  segundo McQuillan, Culham, Yovanovich (1984)[4]

$$\mu(T) = \frac{1,4592 T^{3/2}}{109,10 + T} \quad (24)$$

- Número de Prandtl do ar,  $Pr$  segundo McQuillan, Culham, Yovanovich (1984)[4]

$$Pr(T) = \frac{c_p \mu}{k} \quad (25)$$

- Calor específico do ar a pressão constante,  $c_p$ , (20) segundo McQuillan, Culham, Yovanovich (1984)[4]
- Massa volúmica do ar,  $\rho$ , pela equação (9).

## 2.4 Balanço térmico

O balanço de potências térmicas expressa os ganhos e perdas de energia sofridos pelo volume de controlo; baseia-se na Primeira Lei da Termodinâmica e, de acordo com a descrição feita no Descrição das potências térmicas 2.2, assume a seguinte forma

$$\dot{Q}_{absorvida} = \dot{Q}_{incidente} - \dot{Q}_{radiação} - \dot{Q}_{convecção} \quad (26)$$

pelo que pode ser expresso de acordo com

$$\dot{m}c_p(T_s - T_a) = \alpha IA - \varepsilon A\sigma(T_p^4 - T_{céu}^4) - h_e A(T_p - T_a) \quad (27)$$

ou

$$h_i A(T_p - T_m) = \alpha IA - \varepsilon A\sigma(T_p^4 - T_{céu}^4) - h_e A(T_p - T_a) \quad (28)$$

As incógnitas a determinar são  $T_s$ ,  $T_p$  e  $T_m$ .

## 2.5 Algoritmo

O algoritmo utilizado para resolver o problema consiste num processo iterativo. Foi utilizada a ferramenta *Microsoft Office Excel 2007*.

São conhecidos os valores de  $H$ ,  $D$ , e  $T_a$  (fornecido pelo IPMA, capítulo 1.6). O algoritmo segue o encadeamento seguinte:

1º) Arbitrar uma temperatura  $T_s$  - temperatura de saída do ar da chaminé.

2º) Calcular  $T_m$  com base em  $T_s$  e  $T_a$ , de acordo com (22).

3º) Calcular o caudal volúmico segundo a aproximação (29). Esta é uma correlação empírica que produz valores mais próximos da realidade do que (8) que é deduzida teoricamente.

$$\dot{V} = 0,67 A_{s.r.} \sqrt{2gH \frac{T_m - T_a}{T_m}} \quad (29)$$

4º) Calcular propriedades do ar  $k$ ,  $c_p$ ,  $\mu$  e  $Pr$  de acordo com 23, 20, 24 e 25 à temperatura  $T_a$ .

5º) Calcular  $\dot{Q}_{absorvida}$ , de acordo com (19). Para tal é necessário calcular o caudal mássico e o calor específico,  $c_p$ , ambos à temperatura  $T_m$ .

O caudal mássico é determinado através da multiplicação entre o caudal volúmico determinado no passo 3º e a massa volúmica,  $\rho$ , à temperatura  $T_m$ , determinada segundo (9).

O calor específico calcula-se segundo (20).

6º) Calcular o número de Reynolds segundo (11). A velocidade do escoamento do fluído no interior da chaminé é determinado segundo (7).

7º) Calcular no Número de Nusselt segundo (30).

Se o escoamento dentro da chaminé fosse laminar,  $Nu=3,66$  para temperatura da parede interior da chaminé constante, ou  $Nu=4,364$  para fluxo de calor constante na parede interior da chaminé. É plausível assumir que o caso presente seja melhor representado pela condição de parede interior da chaminé com fluxo de calor constante, se se considerar uniforme a irradiação sobre a face exterior da chaminé. No entanto, para todos os casos adiante estudados, o escoamento será turbulento, com  $Re_D > 2300$ . Assim,

$$Se \begin{cases} Re_D < 2300, Nu = 4,364 \\ Re_D > 2300, Nu = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^n \end{cases} \text{ com } n = 0,4 \quad (30)$$

8º) Determinar  $h_i$  segundo (31)

$$\bar{h}_i = \frac{Nu \cdot k}{D_h} \quad (31)$$

9º) Determinar a temperatura da parede interna da chaminé de acordo com (32)

$$T_{p_i} = \frac{\dot{Q}_{absorvida}}{h_i A_i} + T_m \quad (32)$$

Note-se que foi assumida uma espessura de 2mm, pelo que, para efeitos de cálculo da área interna da chaminé deve usar-se um diâmetro interno igual ao diâmetro externo menos duas vezes a espessura.

10º) Calcular a temperatura da parede externa da chaminé por intermédio de (33)

$$\dot{Q}_{absorvido} = \frac{T_{p_e} - T_{p_i}}{\frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k_c H}} \quad (33)$$

Em que  $k_c$  representa a condutibilidade térmica do material da chaminé, neste caso assumido  $50\text{W/m}^2\text{K}$ ,  $r_e$  e  $r_i$  traduzem os raios externo e interno respetivamente e  $H$  é a altura da chaminé.

11º) Calcular o coeficiente de convecção externo de acordo com (17).

O comprimento característico da chaminé calcula-se segundo (18). Note-se que para o cálculo de  $h_e$ ,  $\nu$  é igual a  $1000/3600$ .

12º) Calcular  $T_{c\acute{e}u}$  segundo (15).

13º) Calcular  $T_s$  a partir de (27).

Note-se que a área a utilizar neste passo é a da superfície externa. Para  $\alpha$  assumiu-se o valor de 0,96 e a  $\varepsilon$  atribuiu-se 0,1.

14º) Introduzir no passo 1º o valor de  $T_s$  obtido passo 13º e repetir o processo até os valores de  $T_s$  segundo os passos 1º e 13º serem iguais.

## 2.6 Metodologia

O equilíbrio para que o sistema tende garante que a energia absorvida pelo fluido no interior da chaminé corresponde à diferença entre a energia que incide e a que a

chaminé perde por radiação e convecção. O caudal de ar gerado dentro da chaminé e as temperaturas  $T_a$ ,  $T_s$  e  $T_p$  tem que ser tais que verifiquem a equação (27).

Tratando-se de um fenómeno físico, existem restrições que o problema deve respeitar, nomeadamente:

$$\dot{Q}_{absorvido} \leq \alpha I A \quad (34)$$

As iterações foram feitas para as seguintes condições:

**Tabela 12 Condições para as iterações**

Variável	Valores	Unidades
H	14; 20	m
I	170; 200; 220	W/m <sup>2</sup>
D	0,1	m
$\alpha$	0,96	-
$\epsilon$	0,1	-
$\sigma$	$5,57 \times 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
Espessura	0,002	m

Para a temperatura do ar foram utilizadas as temperaturas médias mensais registadas para a cidade do Porto:

**Tabela 13 Temperatura média mensal do ar para a cidade do Porto**

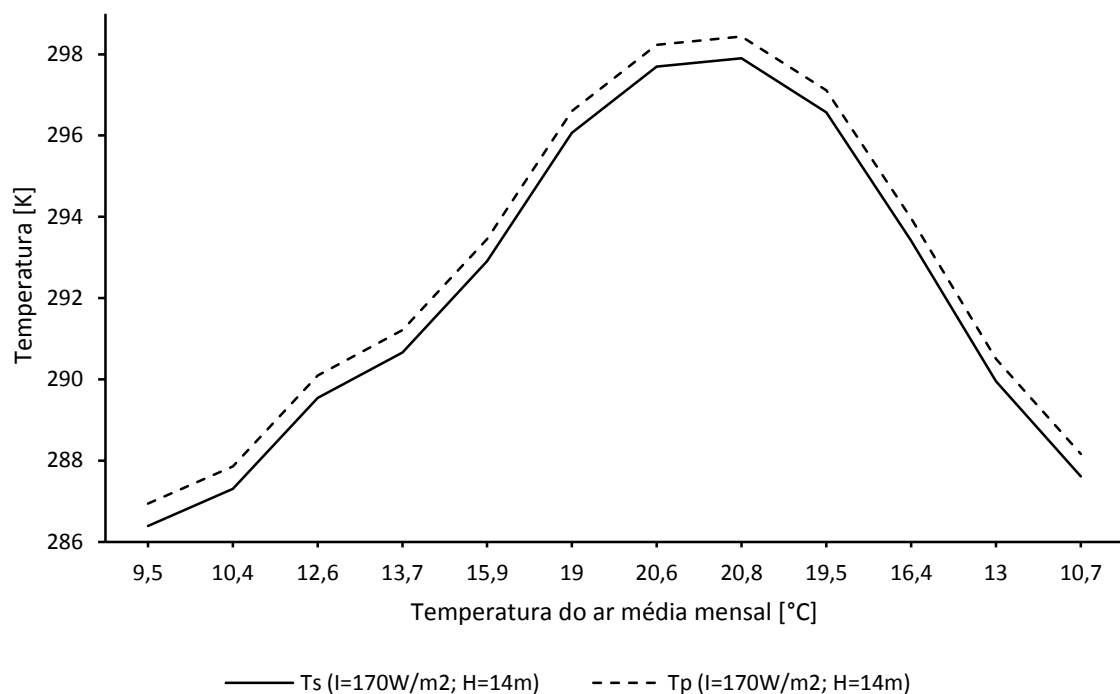
Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7

## 2.7 Resultados obtidos

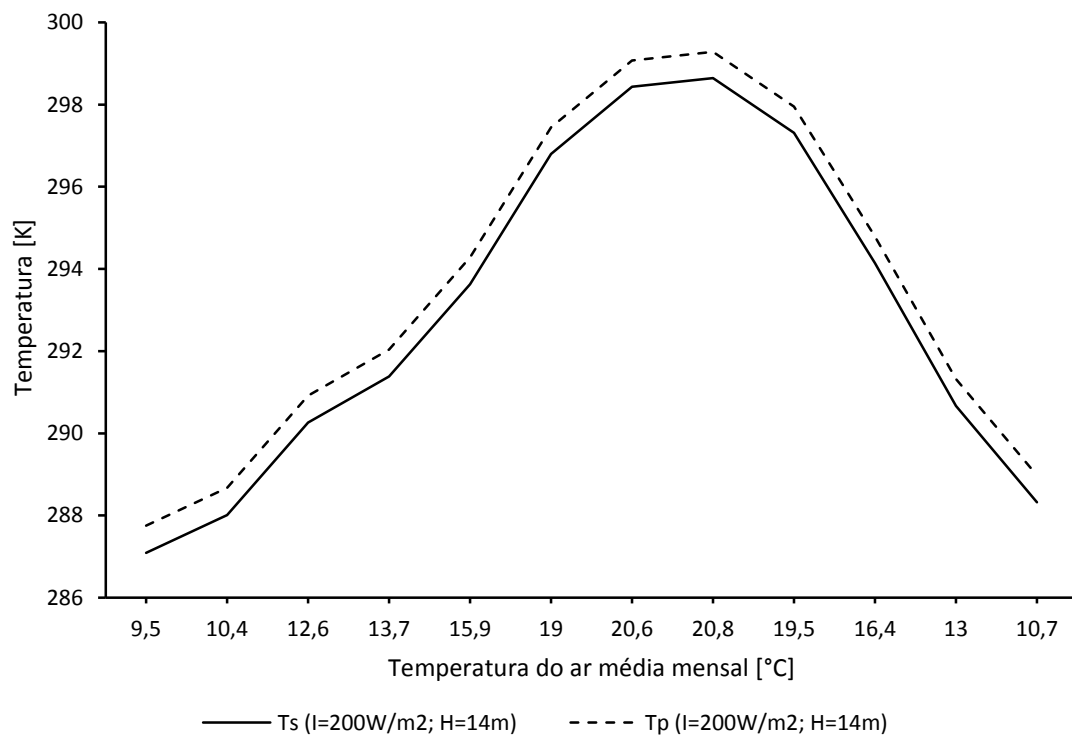
O algoritmo foi executado 72 vezes, cobrindo assim todas as permutações possíveis entre temperatura do ar (12 valores), altura da chaminé (2 valores) e irradiação (3 valores). Para cada iteração foram registados os valores de: temperatura do ar (°C), temperatura de saída do ar (K), temperatura da parede interna (K), temperatura da parede externa (K), caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/s) e as potências incidente, absorvida, perdida por radiação e perdida por convecção, todas expressas em (W). Os resultados podem ser consultados no Anexo A.

### 2.7.1. Análise às temperaturas

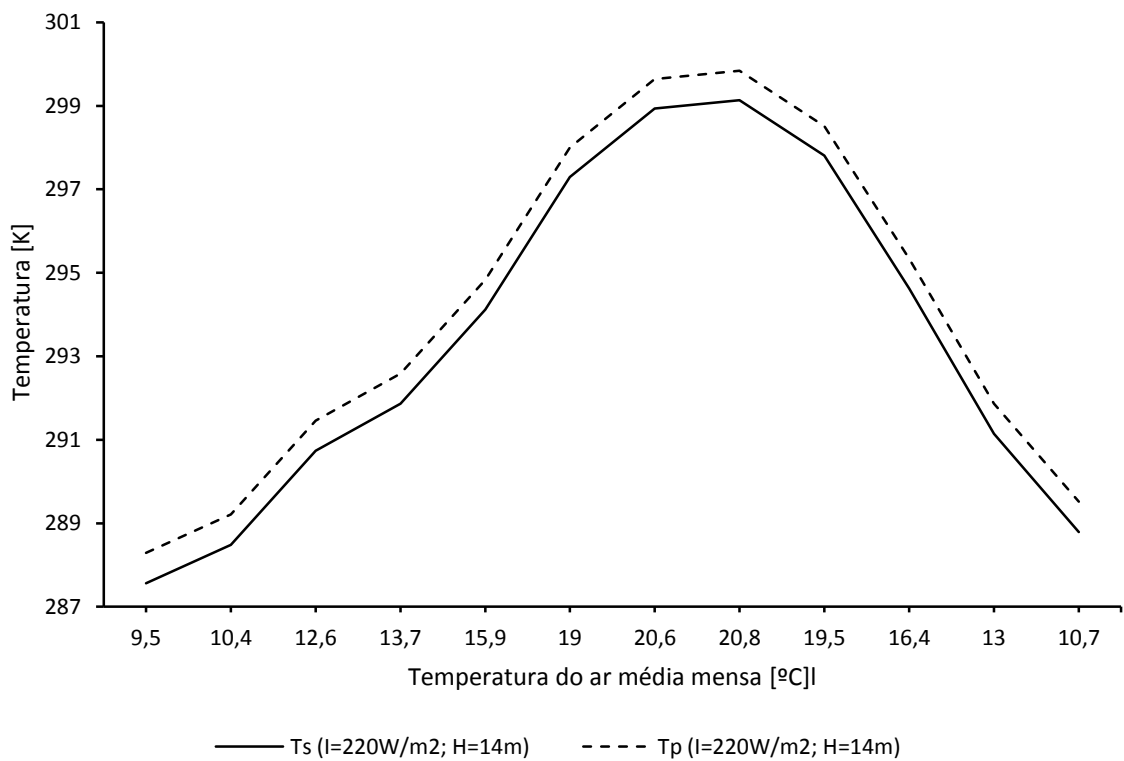
No respeitante a temperaturas, verifica-se por observação das figuras seguintes que as temperaturas de saída do ar e da parede interior da chaminé estão sempre muito próximas o que sugere que o coeficiente de convecção no escoamento dentro da chaminé é alto. Nota-se também que as temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé sobem com o aumento da temperatura do ar ambiente.



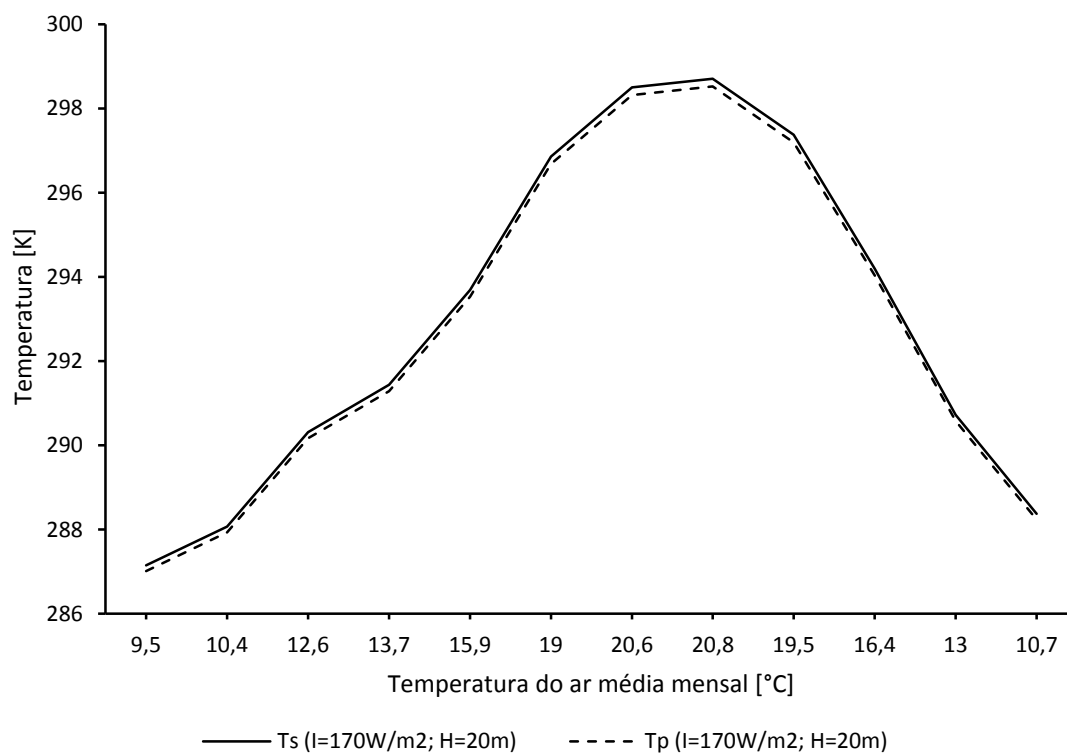
**Figura 8** Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de  $H=14\text{m}$  quando exposta a uma irradiação de  $170\text{W/m}^2$  em função da temperatura média mensal.



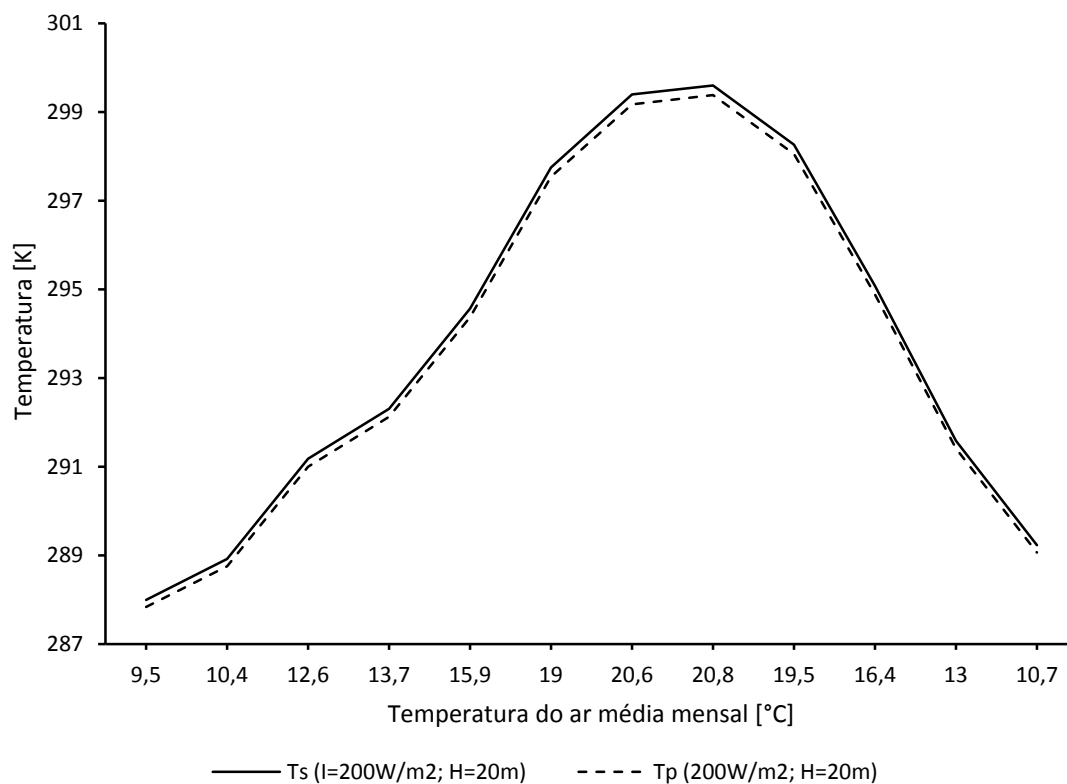
**Figura 9** Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=14m quando exposta a uma irradiação de  $200\text{W/m}^2$  em função da temperatura média mensal.



**Figura 10** Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=14m quando exposta a uma irradiação de  $220\text{W/m}^2$  em função da temperatura média mensal.

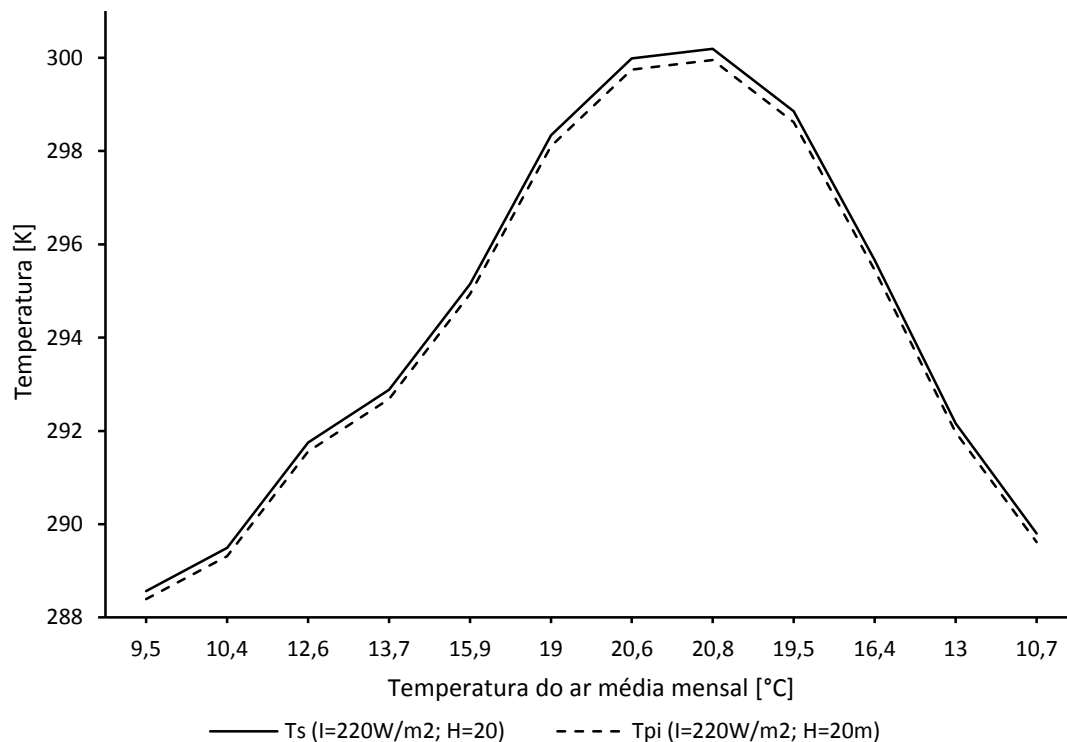


**Figura 11** Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=20m quando exposta a uma irradiação de  $170 \text{ W/m}^2$  em função da temperatura média mensal.



**Figura 12** Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=20m quando exposta a uma irradiação de  $200 \text{ W/m}^2$  em função da temperatura média mensal.





**Figura 13** Temperaturas de saída do ar e da parede interna da chaminé de H=20m quando exposta a uma irradiação de 220W/m<sup>2</sup> em função da temperatura média mensal.

As linhas tracejadas nas Figuras 8, 9, 10, 11 e 13 representam a temperatura da parede interna da chaminé, ao passo que as linhas contínuas ilustram a temperatura de saída.

A temperatura de saída do ar atinge um mínimo de 286,39K para a chaminé de 14m, temperatura do ar exterior de 9,5°C e irradiação de 170W/m<sup>2</sup>; o máximo da temperatura de saída do ar é alcançado para a chaminé de 20m, à temperatura do ar exterior de 20,8°C e irradiação de 220W/m<sup>2</sup> e tem um valor de 300,19K. A chaminé de 20m apresenta temperaturas em média mais elevadas o que se explica pela maior área de superfície absorvedora.

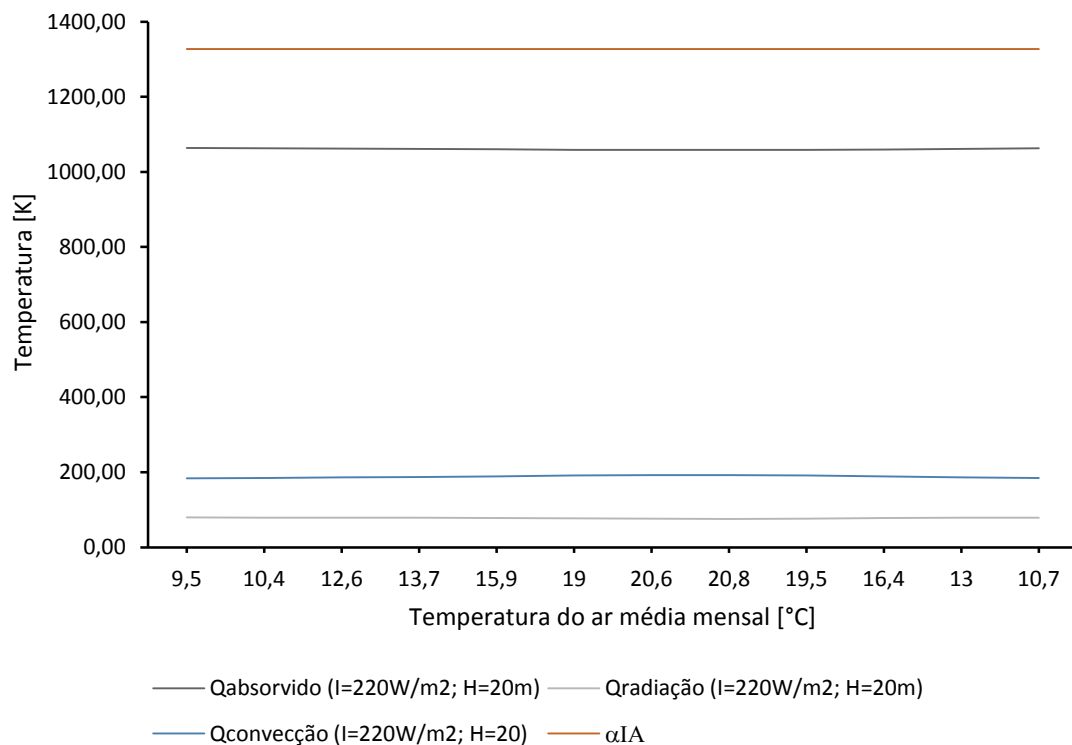
É interessante constatar que a chaminé de altura de 20m atinge temperaturas de saída do ar mais elevadas que as temperaturas da parede interna. O oposto acontece para a chaminé de 14m. Isto deve-se ao facto de, para o escoamento que se forma, a altura da chaminé mais baixa não permitir ao fluído ocupar o seu interior tempo suficiente para elevar a sua temperatura de saída até aos valores verificados para a chaminé mais alta.

As curvas acompanham o perfil aproximadamente sinusoidal exibido pela curva de variação da temperatura média mensal do ar.

### 2.7.2. Análise às potências térmicas

Analisando a Figura 2.7 é fácil constatar que a energia perdida por convecção é, de longe, a maior fonte de perdas. Com efeito, verifica-se que esta é em média, para a ambas as chaminés, cerca de 2,2 vezes maior que a energia perdida por convecção. O exemplo seguinte ilustra a relação entre os valores absolutos das potências incidente, absorvida, perdida por radiação e perdida por convecção para a chaminé mais alta quando exposta a uma irradiação de  $220\text{W/m}^2$ .

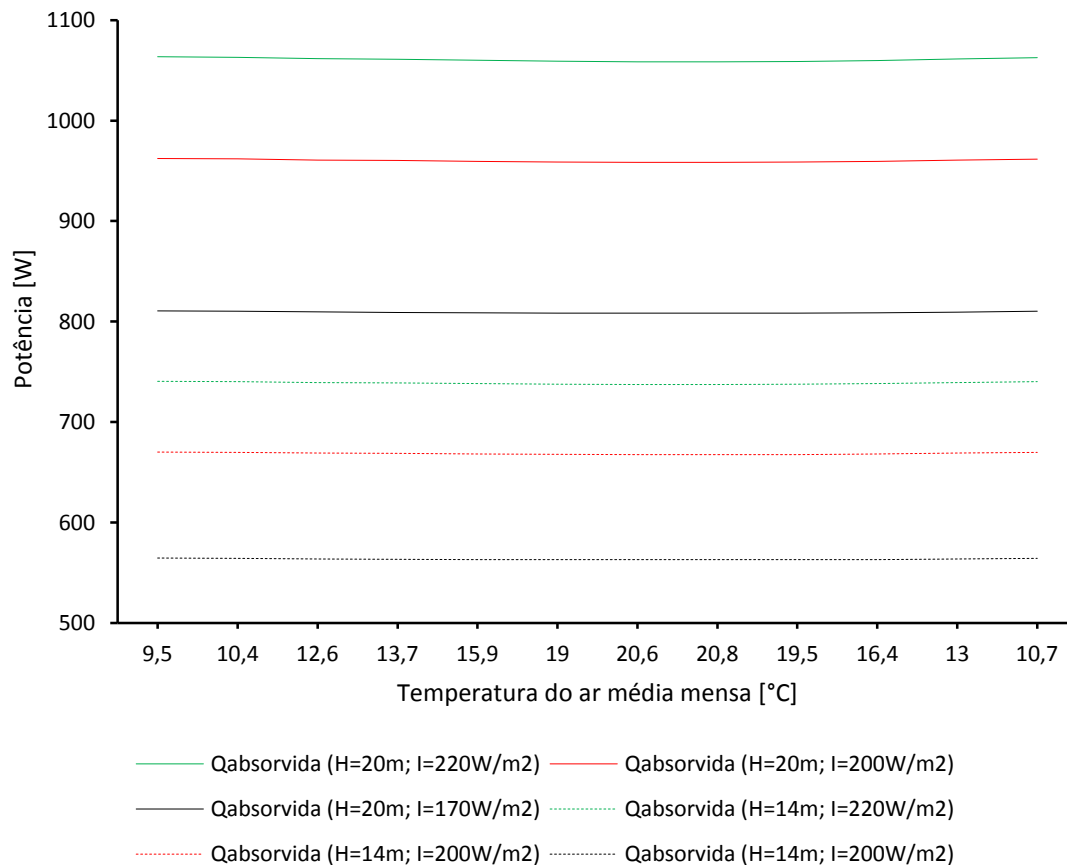
Observa-se também o cumprimento da Primeira Lei da Termodinâmica, já que o balanço (26) é respeitado.



**Figura 14** Potências incidente, absorvida, perdida por convecção e perdida por radiação para a chaminé  $H=20\text{m}$  quando exposta a uma irradiação de  $220\text{W/m}^2$ .

Verificou-se que para todos os casos a proporção de energia absorvida em relação à energia incidente se situa entre 78% e 79%. O mesmo é dizer que todos os cenários conseguem absorver aproximadamente 4/5 da energia incidente. O pior caso ocorre para a chaminé de 14m que consegue absorver apenas 78,5% da energia incidente quando esta provém de uma irradiação de  $170\text{W/m}^2$ . O balanço mais eficiente ocorre para a chaminé mais alta quando sujeita à irradiação de  $220\text{W/m}^2$ . Aqui, o ar interno absorveu 79,93% da energia que incidiu no exterior da chaminé.

Ressalve-se que, ainda que em termos relativos a proporção de energia absorvida em relação à energia incidente seja sempre aproximadamente a mesma, em termos absolutos existe uma variação considerável no valor da potência absorvida, como se constata pela Figura 15.



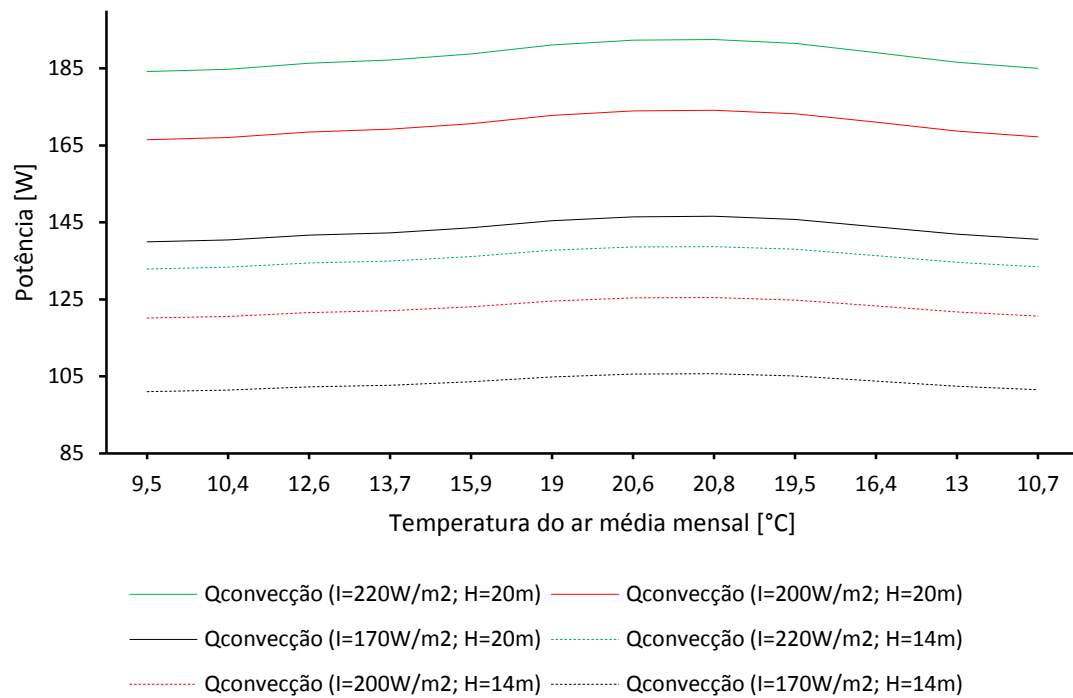
**Figura 15 Potências absorvidas pelo ar no interior da chaminé.**

Em termos absolutos, a chaminé de 20m exposta a uma irradiação de 220W/m<sup>2</sup> consegue absorver em média, ao longo de um ano, uma potência de 1060,70W; para a mesma irradiação a chaminé de 14m absorve apenas 738,75W, ou seja, 69,6% da energia total absorvida pela chaminé mais alta. Constata-se portanto que a chaminé mais alta absorve, no período de um ano, 1,44 vezes mais energia.

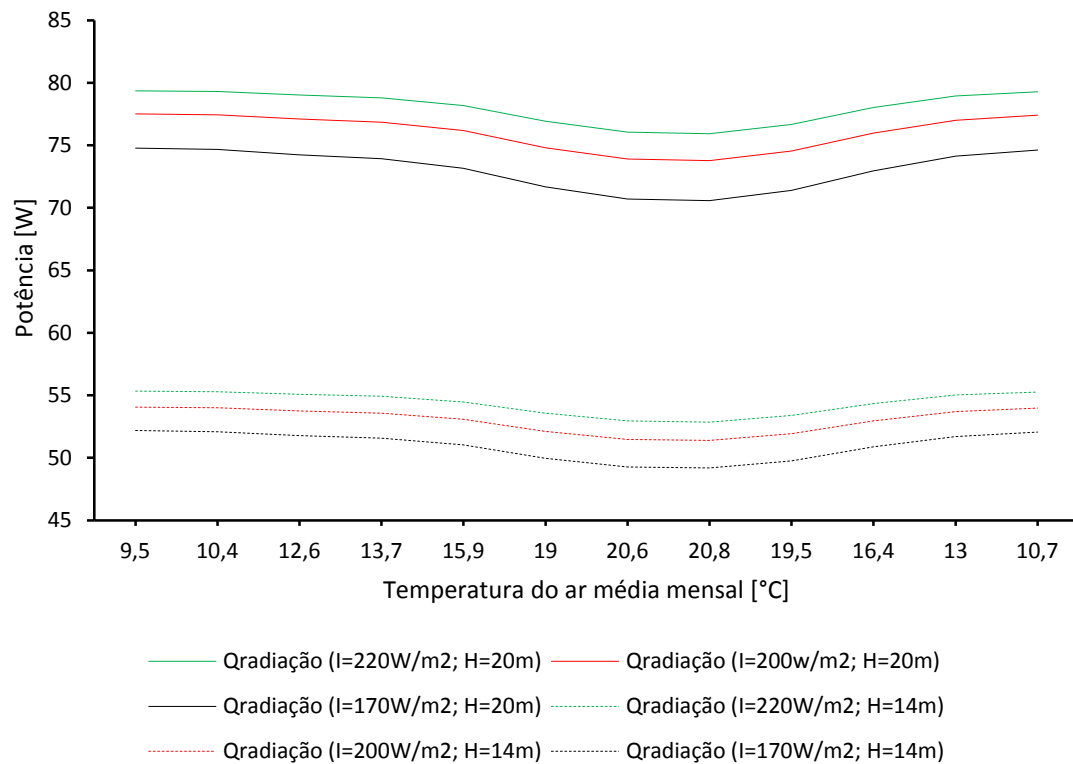
As potências absorvidas mais elevadas ocorrem, naturalmente, para a chaminé mais alta devido à maior área de captação.

Por virtude da escala das figuras Figura 14 e Figura 15 torna-se difícil perceber de que forma as perdas por radiação e convecção oscilam em função variação da temperatura ambiente.

As figuras Figura 16 e Figura 17 permitem observar este fenómeno mais atentamente.



**Figura 16 Potências perdidas por convecção pelo exterior da chaminé.**



**Figura 17 Potências perdidas por radiação pelo exterior da chaminé.**

Naturalmente, a componente radiativa das perdas revela-se mais sensível à temperatura do ar exterior dado que esta variável influencia fortemente a temperatura da parede externa da chaminé (ver Figura 8) que, por sua vez, estando elevada à quarta potência, provoca uma maior variação na potência perdida por este meio.

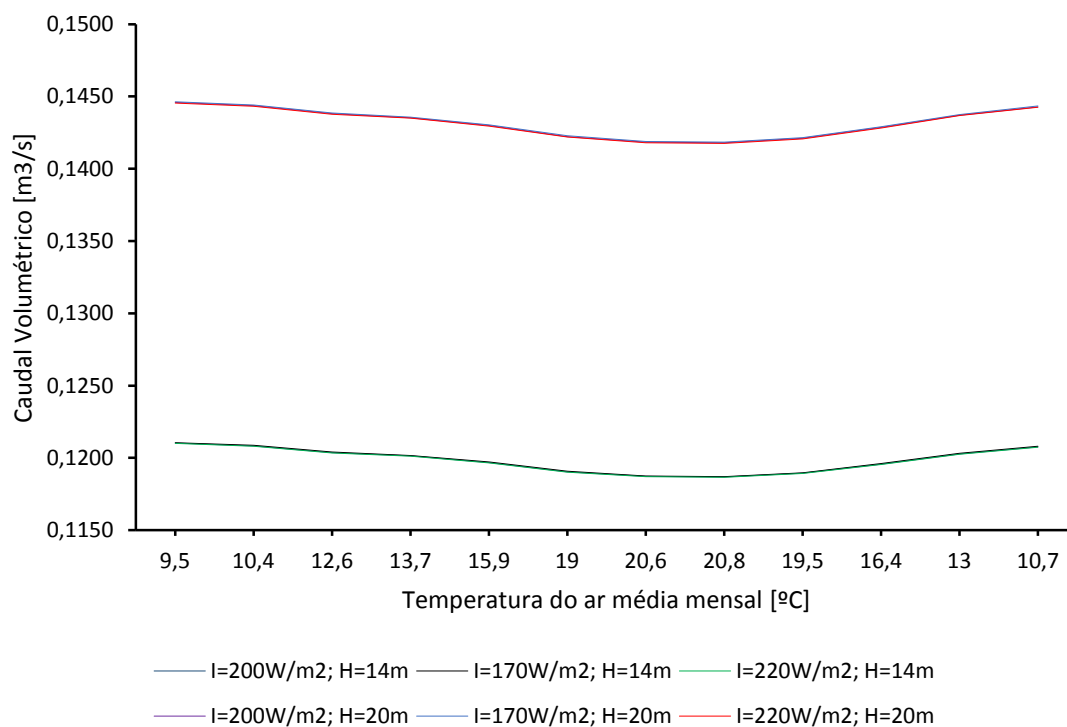
Observa-se que a maior oscilação entre o valor máximo e mínimo da potência perdida por radiação ocorre para a irradiação mais baixa ( $170\text{W/m}^2$ ) e atinge 5,7% na chaminé de 14m. A oscilação das perdas por convecção atinge também o máximo perante a irradiação mais baixa mas ocorre para a chaminé mais alta, sendo que estas variam, no máximo, 4,5%. Isto explica-se com o facto de as perdas por radiação e convecção alcançarem uma maior preponderância na equação (27) conforme a componente incidente diminui em virtude da menor irradiação.

Pode, no entanto, dizer-se que estas oscilações são mínimas se atentarmos ao facto de a temperatura do ar variar entre  $9,5^\circ\text{C}$  e  $20,8^\circ\text{C}$ , ou 54% entre máximo e mínimo.

### **2.7.3. Análise aos caudais**

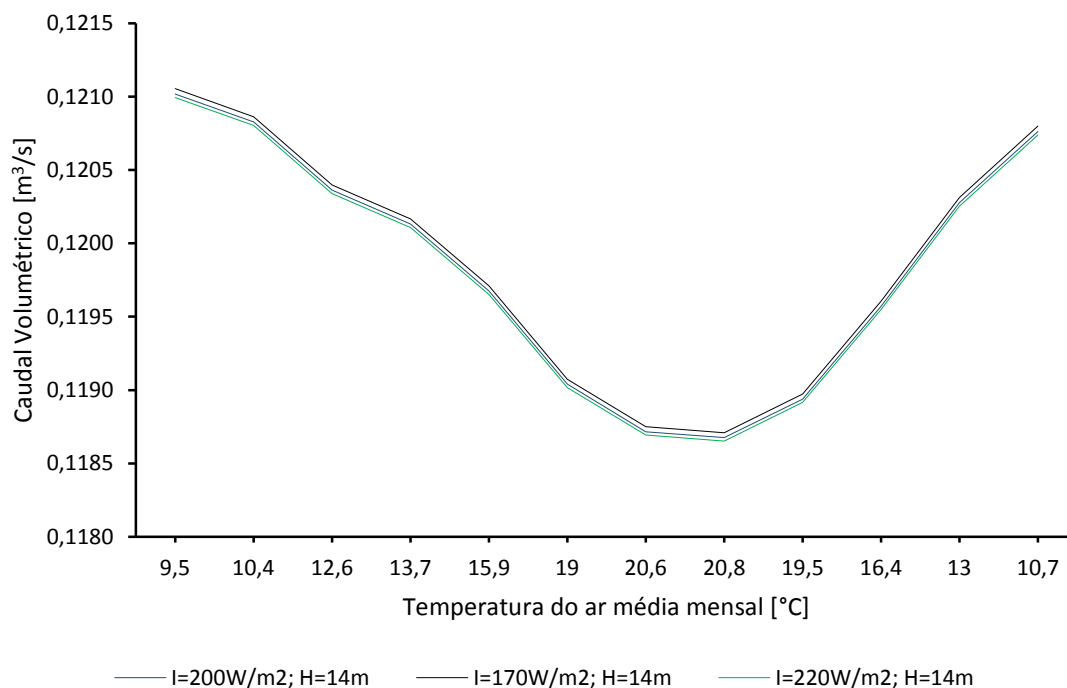
Observando a figura 2.11 conclui-se que o caudal volumétrico gerado depende quase exclusivamente das dimensões da chaminé e da temperatura do ar. A chaminé mais alta gerou caudais na ordem de  $0,1432\text{ m}^3/\text{s}$  enquanto que os da chaminé mais baixa atingiram apenas  $0,1198\text{m}^3/\text{s}$  - uma diferença de 16% em função de uma diferença de 30% na altura.

A variação entre os caudais médios anuais provocada pela variação da irradiação foi de menos de 0,083% para a chaminé de 14m e 0,069% para a chaminé maior, como se observa pela sobreposição das linhas com alturas de chaminé iguais na figura 2.6. Conclui-se portanto que quanto maior a altura da chaminé, menor o impacto da intensidade da irradiação no caudal volumétrico gerado.



**Figura 18 Caudais volumétricos gerados.**

O impacto da temperatura do ar, contudo, é bem notório como se verifica Figura 19.



**Figura 19 Caudal volumétrico gerado para a chaminé de altura  $H=14\text{m}$ .**

Quanto mais alta a temperatura do ar, mais baixo o caudal gerado, o que se comprova com (29). De facto, o caudal varia de forma linear com a temperatura do ar, decrescendo

a um passo de cerca de 0,13l/s por grau centígrado na chaminé de 20m, e 0,11l/s por grau centígrado na chaminé de 14m. Assim é fácil perceber que a curva que representa o caudal gerado na Figura 9 se assemelha à curva da temperatura do ar invertida (ver Figura 7).

# Capítulo III

## 3.1 Introdução

A energia incidente numa superfície localizada na superfície da Terra depende da posição do Sol e da permeabilidade da atmosfera.

A posição do Sol no céu terrestre é facilmente calculada com elevado grau de precisão através de equações já estabelecidas. Conhecendo a posição do Sol e a intensidade da radiação que este emite em direção à superfície exterior da atmosfera terrestre é possível calcular a intensidade com que as diversas componentes da radiação solar atingem uma superfície a um determinado ângulo  $\beta$  com a horizontal. À soma destas várias componentes que incidem numa superfície dá-se o nome de irradiação dessa superfície e é com base nesta irradiação que se calculará, em seguida, o potencial energético disponível numa chaminé situada na cidade do Porto, de acordo com o método iterativo já utilizado no capítulo II.

## 3.2 Dados Solares

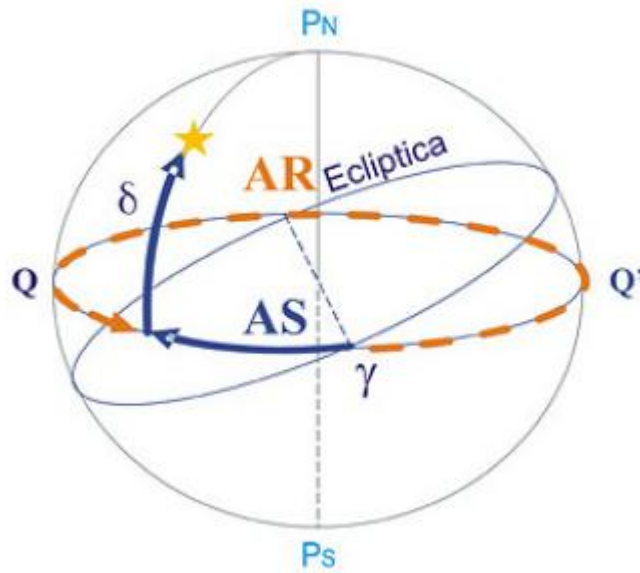
### 3.2.1. Sistema de coordenadas

Os dados solares foram calculados segundo o sistema de coordenadas equatorial,

Figura 20 Sistema de coordenadas equatorial.



. Este sistema assume um modelo geocêntrico por ser mais intuitivo. O eixo que une os pólos terrestres está alinhado com o eixo que une os pólos da esfera celeste. Por seu lado, o plano do equador é-lhe perpendicular.



**Figura 20 Sistema de coordenadas equatorial.**

A posição dos astros é facilmente descrita por dois ângulos: declinação,  $\delta$ , e ascensão reta, AR.

A declinação do Sol, calculada de acordo com (34), onde  $n$  varia entre 1 e 366 e representa o número do dia do ano (21 de Março,  $n= 80$ ; 21 de Dezembro,  $n = 356$ ).

$$\delta = 23.45 \text{sen} \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (35)$$

### 3.2.2. Constante Solar

A radiação emitida pelo Sol é determinada com base na aproximação de que o Sol se comporta como um corpo negro a 5780K. Portanto, o poder emissivo do Sol é dado por (35).

$$e_b = \sigma T^4 \quad (36)$$

Daqui resulta que o poder emissivo do Sol é de 63 288 534W/m<sup>2</sup>.

A área da superfície exterior do Sol pode ser calculada por  $\pi D_{sol}^2$ , onde  $D_{sol}$  é 1,39×10<sup>9</sup>m. Tem-se então que a área da superfície do Sol é 6,07×10<sup>18</sup>m<sup>2</sup>. A potência

térmica total hemisférica emitida pelo Sol corresponde  $e_b \pi D_{sol}^2$ , ou seja,  $3,84 \times 10^{26}$  W. Sendo a distancia entre a Terra e o Sol de  $150 \times 10^9$  m, a potência térmica que atinge os confins da atmosfera terrestre é de  $1358 \text{ W/m}^2$ . Este valor é bastante próximo do obtido em medições feitas no princípio do século XX, em que o valor de  $1367 \text{ W/m}^2$  foi verificado com uma margem de erro de 1,5%, sendo adotado doravante neste documento como a constante solar.

O valor médio diário da constante solar, expresso em  $\text{W/m}^2$ , é dado por (36).

$$S_{on} = 1367 \left( 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right) \quad (37)$$

### 3.2.3. Radiação solar

Como referido no capítulo 2.2.1, existem na superfície terrestre chegam três tipos de radiação: direta, difusa e albedo.

A componente direta,  $S$ , representa a radiação que deixa o Sol e atinge a superfície terrestre sem interagir com quaisquer corpos no caminho, normalmente nuvens. A componente indireta ou difusa,  $D$ , resulta da interferência de nuvens na radiação direta. À reflexão destas duas componentes em edifícios e no solo dá-se o nome de albedo e representar-se por  $L$ .

A radiação global,  $G$ , é então dada por  $G = S + D$ , ao passo que a irradiação corresponde a  $I = S + D + L$ .

Neste trabalho utilizou-se a metodologia de descrição em que os sobrescritos  $i$ ,  $hm$ ,  $d$  e  $dm$  que significam instantâneo, horário médio mensal, diário e diário médio mensal, respetivamente.

### 3.2.4. Radiação incidente numa superfície horizontal

Para a latitude da cidade do Porto,  $\Phi = 41^\circ$ , e com o ângulo horário do pôr-do-Sol calculado segundo (37), é possível calcular a radiação solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal,  $S_{oh}^d$  (38).

$$H_o = \arccos(-\operatorname{tg}\delta \operatorname{tg}\Phi) \quad (38)$$

$$S_{oh}^d = \frac{24 * 3600}{\pi} 1367 \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \left[ \cos\Phi \cos\delta \operatorname{sen} H_o + \frac{2\pi H_o}{360} \operatorname{sen}\Phi \operatorname{sen}\delta \right] \quad (39)$$

O índice de claridade,  $K_T$ , traduz a permeabilidade de atmosfera terrestre à radiação solar. O significado desta variável é intuitivo porquanto se verificam maiores índices de claridade no sul de Portugal do que no norte, o que vai ao encontro da nossa perceção de que no sul há, geralmente, céus mais “limpos”. Matematicamente pode dizer-se que  $K_T = G_h / S_{oh}$ .

Assim, determina-se facilmente a radiação global média horária incidente numa superfície horizontal pousada no chão terrestre de acordo com  $G_h = S_{oh} \times K_T$ .

**Tabela 14** Ângulo horário do pôr-do-Sol, valor médio diário da constante solar, declinação solar média mensal, índice de claridade e radiação global média diária incidente numa superfície horizontal situada na cidade do Porto.

Mês	$H_0$	$\overline{S_{oh}}$	$\delta$	Índice de claridade ( $K_T$ )	$\overline{G_h}$
	[Grau]	[J/(m <sup>2</sup> .dia)]	[Rad]	[-]	[J/(m <sup>2</sup> .dia)]
<b>Janeiro</b>	70,64	$1,46 \times 10^7$	$-3,64 \times 10^{-1}$	0,465	$6,81 \times 10^6$
<b>Fevereiro</b>	78,08	$1,97 \times 10^7$	$-2,33 \times 10^{-1}$	0,522	$1,03 \times 10^7$
<b>Março</b>	87,91	$2,70 \times 10^7$	$-4,17 \times 10^{-2}$	0,545	$1,47 \times 10^7$
<b>Abril</b>	98,40	$3,44 \times 10^7$	$1,66 \times 10^{-1}$	0,619	$2,13 \times 10^7$
<b>Mai</b>	107,26	$3,96 \times 10^7$	$3,28 \times 10^{-1}$	0,617	$2,44 \times 10^7$
<b>Junho</b>	111,74	$4,17 \times 10^7$	$4,03 \times 10^{-1}$	0,641	$2,68 \times 10^7$
<b>Julho</b>	109,62	$4,06 \times 10^7$	$3,68 \times 10^{-1}$	0,674	$2,74 \times 10^7$
<b>Agosto</b>	101,59	$3,60 \times 10^7$	$2,26 \times 10^{-1}$	0,659	$2,37 \times 10^7$
<b>Setembro</b>	91,39	$2,92 \times 10^7$	$2,78 \times 10^{-2}$	0,604	$1,76 \times 10^7$
<b>Outubro</b>	80,95	$2,16 \times 10^7$	$-1,78 \times 10^{-1}$	0,554	$1,20 \times 10^7$
<b>Novembro</b>	72,27	$1,56 \times 10^7$	$-3,36 \times 10^{-1}$	0,498	$7,77 \times 10^6$
<b>Dezembro</b>	68,21	$1,31 \times 10^7$	$-4,04 \times 10^{-1}$	0,475	$6,22 \times 10^6$

A relação entre a radiação direta e global é calculada segundo (39).

$$\frac{D_h^{dm}}{G_h^{dm}} = 0,775 + 0,00653(H_0 - 90) - [0,0505 + 0,00455(H_0 - 90)]\cos(115K_T^{dm} - 103) \quad (40)$$

### 3.2.5. Radiação incidente numa superfície inclinada

A razão entre a radiação direta incidente numa superfície horizontal e uma superfície inclinada  $\beta$  graus em relação à horizontal é dada por:

$$R_s = \frac{S_\beta}{S_h} \quad (41)$$

O valor de  $R_s$  diário médio mensal é dado, para o hemisfério norte, por:

$$R_s^{dm} = \frac{\cos(\Phi + \beta) \cos\delta \sin H_0^{min} + \pi/180 H_0^{min} \sin(\Phi - \beta) \sin\delta}{\cos\Phi \cos\delta \sin H_0 + \pi/180 H_0 \sin\Phi \sin\delta} \quad (42)$$

Note-se que  $H_0^{min}$  é o valor mínimo entre  $\arccos(-\tan\Phi \tan\delta)$  e  $\arccos[-\tan(\Phi - \beta) \tan\delta]$ .

Naturalmente, tratando-se de uma chaminé vertical o valor de  $\beta$  é de  $90^\circ$ .

O valor total da radiação é dado por (43). As parcelas da soma do lado direito da equação representam, respetivamente, a radiação direta, difusa e albedo.

$$R^{dm} = \left(1 - \frac{D_h^{dm}}{G_h^{dm}}\right) R_s^{dm} + \frac{D_h^{dm}}{G_h^{dm}} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (43)$$

Assim, a radiação sobre a chaminé distribui-se conforme se verifica na Tabela 15.

**Tabela 15 Intensidade da radiação direta, difusa e albedo sobre uma superfície inclinada 90° em relação à horizontal situada na cidade do Porto.**

Mês	DIRECTA			DIFUSA		ALBEDO	
	$R_s$	$(1-D_H/G_H)*R_s$	$S_\beta \times 10^6$	$D_H/G_H*(1+\cos\beta)/2$	$D_\beta \times 10^6$	$\rho(1-\cos\beta)/2$	$L_\beta \times 10^5$
	[-]	[-]	[J/(m <sup>2</sup> dia)]	[-]	[J/(m <sup>2</sup> dia)]	[-]	[J/(m <sup>2</sup> dia)]
<b>Jan.</b>	2,41	1,5	10,2	0,19	1,29	0,05	3,40
<b>Fev.</b>	1,68	1,06	10,9	0,18	1,89	0,05	5,15
<b>Mar.</b>	0,99	0,61	8,96	0,19	2,82	0,05	7,35
<b>Abr.</b>	0,5	0,32	6,76	0,18	3,92	0,05	10,6
<b>Mai.</b>	0,27	0,16	3,95	0,20	4,80	0,05	12,2
<b>Jun.</b>	0,19	0,11	3,03	0,20	5,22	0,05	13,4
<b>Jul.</b>	0,22	0,14	3,83	0,18	5,02	0,05	13,7
<b>Ago.</b>	0,4	0,26	6,18	0,18	4,21	0,05	11,9
<b>Set.</b>	0,8	0,51	9,01	0,18	3,16	0,05	8,82
<b>Out.</b>	1,45	0,93	11,2	0,18	2,13	0,05	5,98
<b>Nov.</b>	2,23	1,42	11,0	0,18	1,41	0,05	3,88
<b>Dez.</b>	2,7	1,72	10,7	0,18	1,13	0,05	3,11

Existe, por norma, uma prevalência da radiação direta sobre a superfície exceto para os meses de Maio, Junho e Julho, o que se explica pelo facto de o Sol ocupar um lugar mais “alto” no céu, incidindo diretamente na superfície cilíndrica da chaminé com menor intensidade. Desta forma, a radiação difusa torna-se a maior fonte de energia para a chaminé.

As potências, em W/m<sup>2</sup>, são apresentadas na Tabela 16.

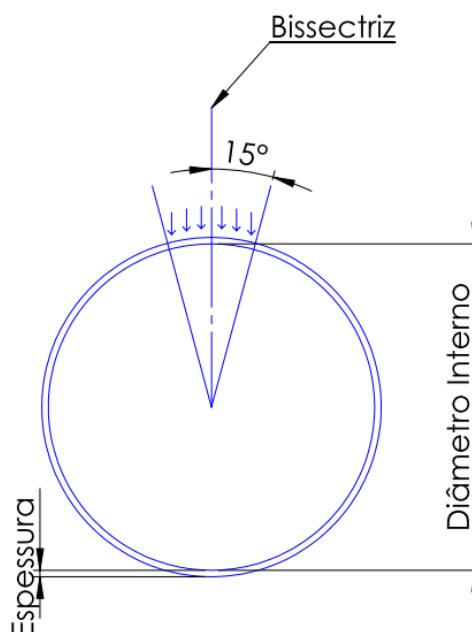
**Tabela 16 Intensidade da radiação direta, difusa e albedo em W/m<sup>2</sup> sobre uma superfície inclinada 90° em relação à horizontal situada na cidade do Porto**

Mês	$I_s$ (Directa)		$I_D$ (Difusa)		$I_L$ (Albedo)	
	[J/(m <sup>2</sup> dia)]	[W/m <sup>2</sup> ]	[J/(m <sup>2</sup> dia)]	[W/m <sup>2</sup> ]	[J/(m <sup>2</sup> dia)]	[W/m <sup>2</sup> ]
<b>Janeiro</b>	$1,02 \times 10^7$	118,11	$1,29 \times 10^6$	14,894	$3,40 \times 10^5$	3,941
<b>Fevereiro</b>	$1,09 \times 10^7$	126,69	$1,89 \times 10^6$	21,874	$5,15 \times 10^5$	5,955
<b>Março</b>	$8,96 \times 10^6$	103,65	$2,82 \times 10^6$	32,631	$7,35 \times 10^5$	8,507
<b>Abril</b>	$6,76 \times 10^6$	78,19	$3,92 \times 10^6$	45,335	$1,06 \times 10^6$	12,311
<b>Maio</b>	$3,95 \times 10^6$	45,71	$4,80 \times 10^6$	55,579	$1,22 \times 10^6$	14,139
<b>Junho</b>	$3,03 \times 10^6$	35,08	$5,22 \times 10^6$	60,430	$1,34 \times 10^6$	15,486
<b>Julho</b>	$3,83 \times 10^6$	44,35	$5,02 \times 10^6$	58,060	$1,37 \times 10^6$	15,833
<b>Agosto</b>	$6,18 \times 10^6$	71,54	$4,21 \times 10^6$	48,748	$1,19 \times 10^6$	13,743
<b>Setembro</b>	$9,01 \times 10^6$	104,23	$3,16 \times 10^6$	36,517	$8,82 \times 10^5$	10,203

<b>Outubro</b>	$1,12 \times 10^7$	129,24	$2,13 \times 10^6$	24,701	$5,98 \times 10^5$	6,920
<b>Novembro</b>	$1,10 \times 10^7$	127,75	$1,41 \times 10^6$	16,322	$3,88 \times 10^5$	4,496
<b>Dezembro</b>	$1,07 \times 10^7$	124,00	$1,13 \times 10^6$	13,075	$3,11 \times 10^5$	3,601

### 3.3 Potência térmica na chaminé

A potência disponível na chaminé depende da área exposta à radiação. Assim, considerando duas chaminés com as dimensões utilizadas no capítulo 2, diâmetros de 0,1m e alturas de 14 e 20m, e atendendo ao facto de serem cilíndricas, segue que a potência absorvida pela radiação direta (que teoricamente incide apenas numa geratriz da chaminé), mas que na prática se espalhará por  $15^\circ$  para cada um dos lados da mesma geratriz da chaminé, ou seja,  $P_S = I_S \pi D L 30/360$  tal como indicado na **Erro! A origem da eferência não foi encontrada.**, porquanto se pode assumir que na superfície abrangida por este intervalo de  $30^\circ$  a intensidade de radiação direta é constante, Duffie *et* Beckman (1991)[1].



**Figura 21** Vista de topo da chaminé ilustrativa da área da superfície exterior na qual se quantificam os ganhos por radiação direta.

As potências difusa e albedo, por serem omnidirecionais, são dadas por  $P_D = I_D \pi D H$  e  $P_L = I_L \pi D H$ , respetivamente.

A potência total resulta da soma das potências diretas, indiretas e albedo. Já a potência térmica disponível à chaminé é portanto o quociente entre a soma das três potências supramencionadas e a área da chaminé. Estas relações estão apresentadas na Tabela 15.

A terminologia L1 e L2 diz respeito à chaminé de 14m e 20m de altura, respetivamente.

$$I_{FINAL} = \frac{P_S + P_D + P_L}{\pi DH} \quad (44)$$

**Tabela 17 Potência proveniente de radiação direta, difusa e albedo e irradiação final incidente na chaminé**

Mês	<i>Potência <math>I_S</math></i>		<i>Potência <math>I_D + I_L</math></i>		<i>Potência TOTAL</i>		$I_{FINAL}$
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	
	[W]		[W]		[W]		
<b>Janeiro</b>	43,29	61,84	82,84	118,34	126,13	180,18	28,677
<b>Fevereiro</b>	46,43	66,33	122,40	174,85	168,83	241,19	38,386
<b>Março</b>	37,99	54,27	180,93	258,48	218,92	312,75	49,775
<b>Abril</b>	28,66	40,94	253,54	362,20	282,20	403,14	64,162
<b>Maio</b>	16,75	23,94	306,64	438,05	323,39	461,99	73,528
<b>Junho</b>	12,86	18,37	333,90	476,99	346,75	495,36	78,839
<b>Julho</b>	16,26	23,22	325,00	464,28	341,25	487,51	77,589
<b>Agosto</b>	26,22	37,46	274,85	392,64	301,07	430,10	68,453
<b>Setembro</b>	38,20	54,58	205,49	293,55	243,69	348,13	55,407
<b>Outubro</b>	47,37	67,67	139,08	198,68	186,45	266,35	42,391
<b>Novembro</b>	46,82	66,89	91,57	130,81	138,39	197,70	31,464
<b>Dezembro</b>	45,45	64,93	73,35	104,78	118,79	169,71	27,009

Previsivelmente, as maiores potências verificaram-se para a chaminé de maiores dimensões. Verifica-se uma vez mais um decréscimo da potência associada à radiação direta pelo motivo já anteriormente explicado.

Estes valores, à primeira vista baixos, são mais intuitivos se lembrarmos que dizem respeito a uma superfície inclinada 90° em relação à horizontal. Naturalmente, para que o efeito chaminé ocorra, é necessário que esta verticalidade se verifique o que irá ter por consequência uma irradiação diminuída. Uma maior perpendicularidade em relação à direção de incidência das ondas eletromagnéticas proporcionaria um acréscimo nesta variável.

### **3.4 Resultados obtidos**

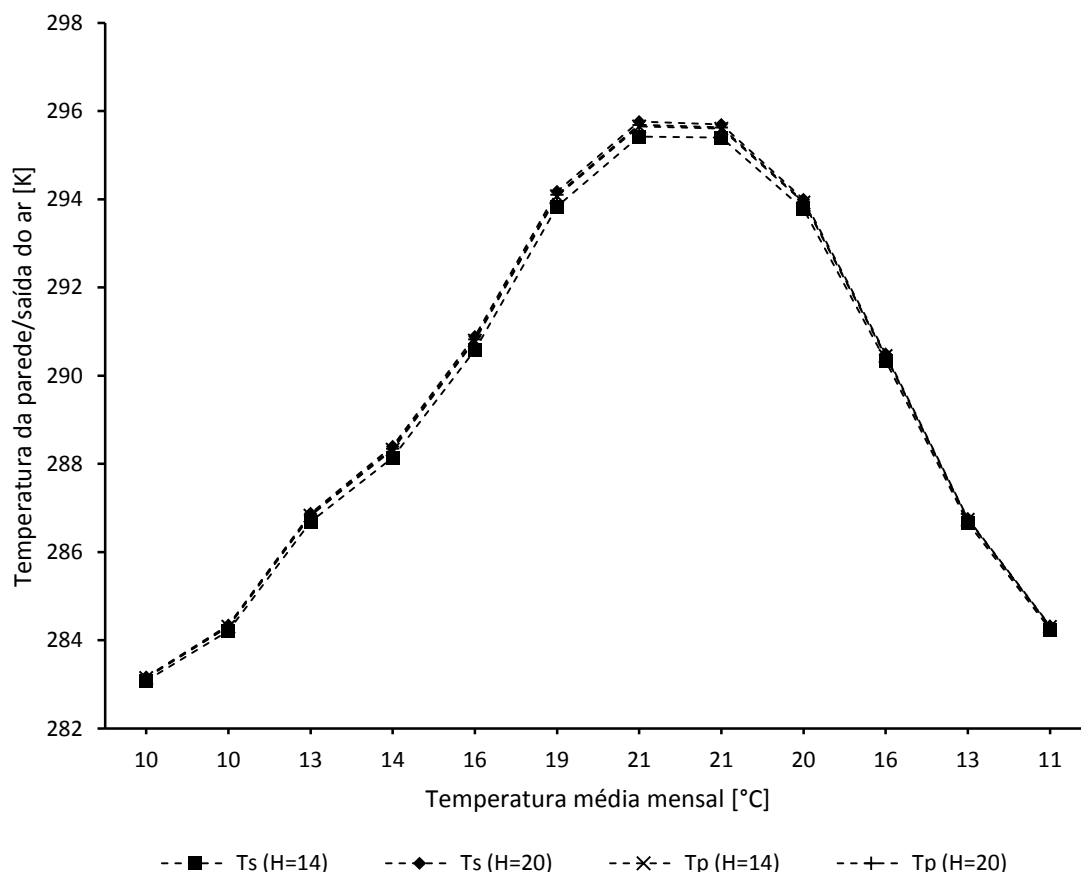
Foi utilizado o algoritmo apresentado no capítulo 2. Contudo, para além da temperatura do ar exterior  $T_a$ , alterou-se também, para cada mês, a irradiação para os valores apresentados na coluna  $I_{FINAL}$  da Tabela 17.

Os resultados podem ser consultados no Anexo B.

#### **3.4.1. Análise às temperaturas**

Tal como indicado nos estudos preliminares, as temperaturas apresentam um perfil aproximadamente sinusoidal. Nestas circunstâncias, contudo, este fenómeno não se deve exclusivamente à temperatura do ar exterior mas também à variação da intensidade da irradiação. As irradiações de menor intensidade (calculadas no capítulo 3.3) relativamente às assumidas no capítulo 2 dão origem a temperaturas da parede e de saída do ar também mais baixas. Aqui, o pico de temperaturas verificou-se para o mês de Julho e atinge 295,69K na chaminé de 20m, a que registou temperaturas mais elevadas.





**Figura 22** Temperatura da parede e temperatura de saída do ar em função da temperatura média mensal e irradiação.

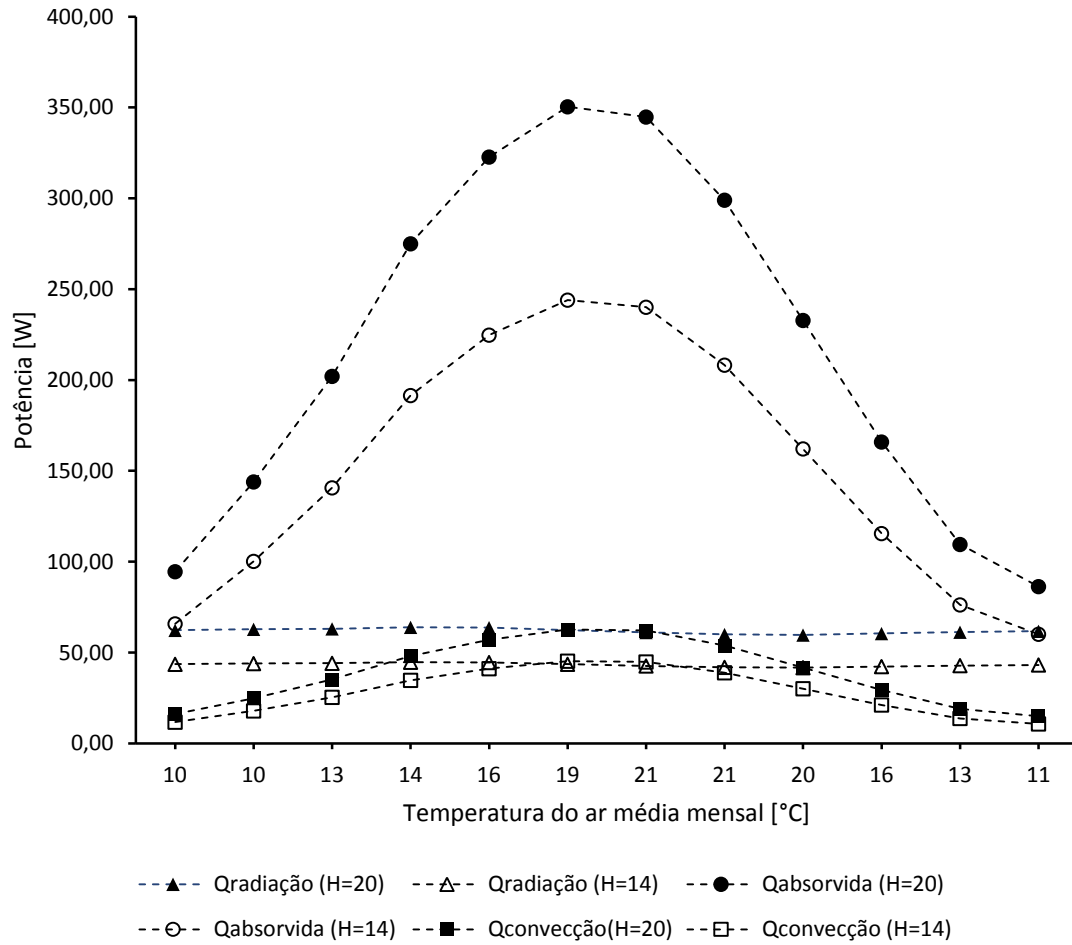
A sobreposição das linhas ilustra bem a proximidade entre as temperaturas registadas. O acréscimo de temperatura entre as de entrada e saída foi de 1,25°C para a chaminé de 20m e apenas de 1,04°C para a de 14m. A temperatura de saída da chaminé mais alta foi, em média, 1,25% mais alta que a da chaminé mais baixa.

### 3.4.2. Análise às potências térmicas

Ao comparar a Figura 23 com as Figura 14 e Figura 15 torna-se evidente o efeito dramático que a variação da irradiação introduz no desempenho do sistema. Nota-se que o pico da potência absorvida (junho) mais do que quadruplica em relação ao seu valor mais baixo (dezembro). Para o mesmo período, o incremento de irradiação é de apenas 2,9 vezes.

Também as perdas por convecção variam por um fator de 4 entre os seus valores máximos e mínimos. As perdas por radiação, por outro lado, variam apenas cerca de 10%. Isto deve-se ao facto destas perdas dependerem do binómio de temperaturas céu e parede externa; variáveis notoriamente estáveis ao longo de todas as iterações. Verifica-

se que os valores agora registados pouco se diferenciam dos determinados no capítulo II.



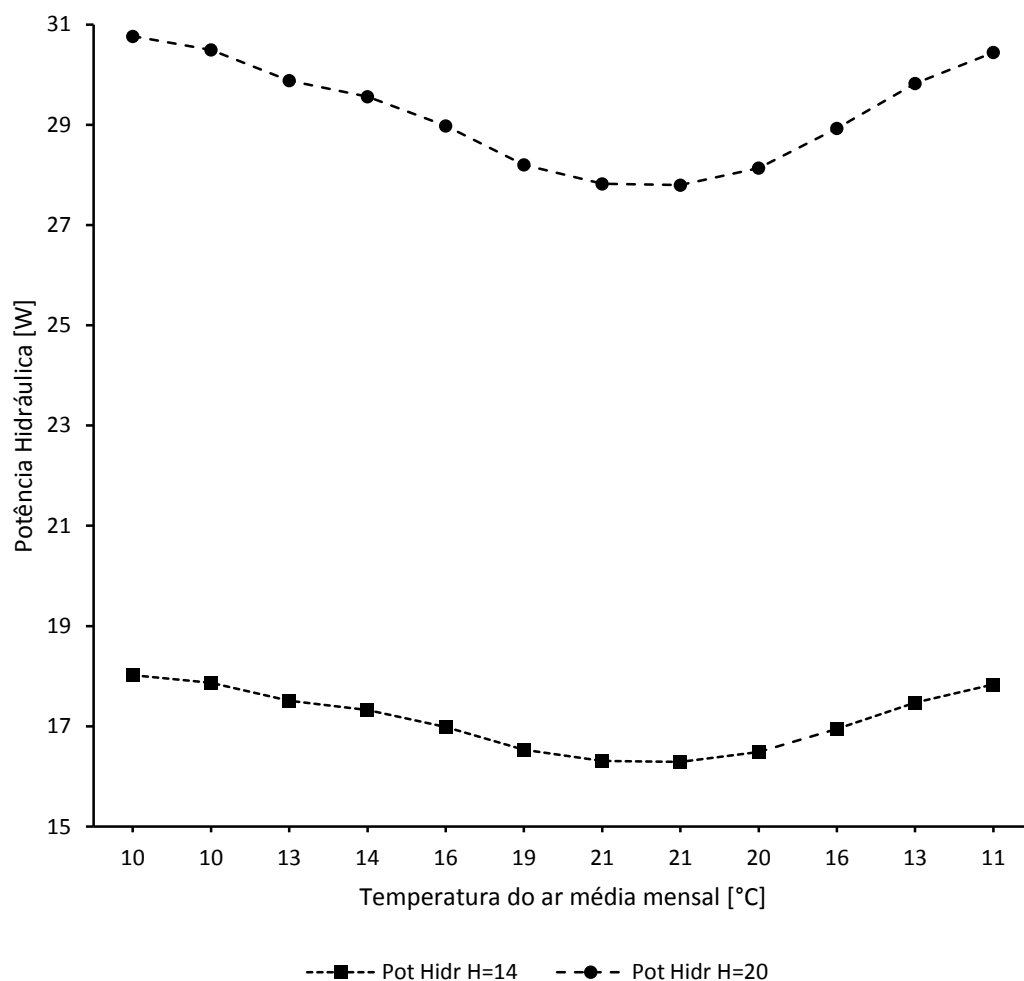
**Figura 23 Potências térmicas em função da temperatura média mensal e irradiação.**

Constata-se também que perante irradiações mais baixas o equilíbrio do sistema tende para condições em que as perdas por radiação são, por vezes, menores que as de convecção. Isto não se verificou nos cálculos do capítulo II e surge como consequência das temperaturas de parede externa mais baixas que derivam das menores irradiações.

### 3.5 Potência hidráulica e caudal volúmico

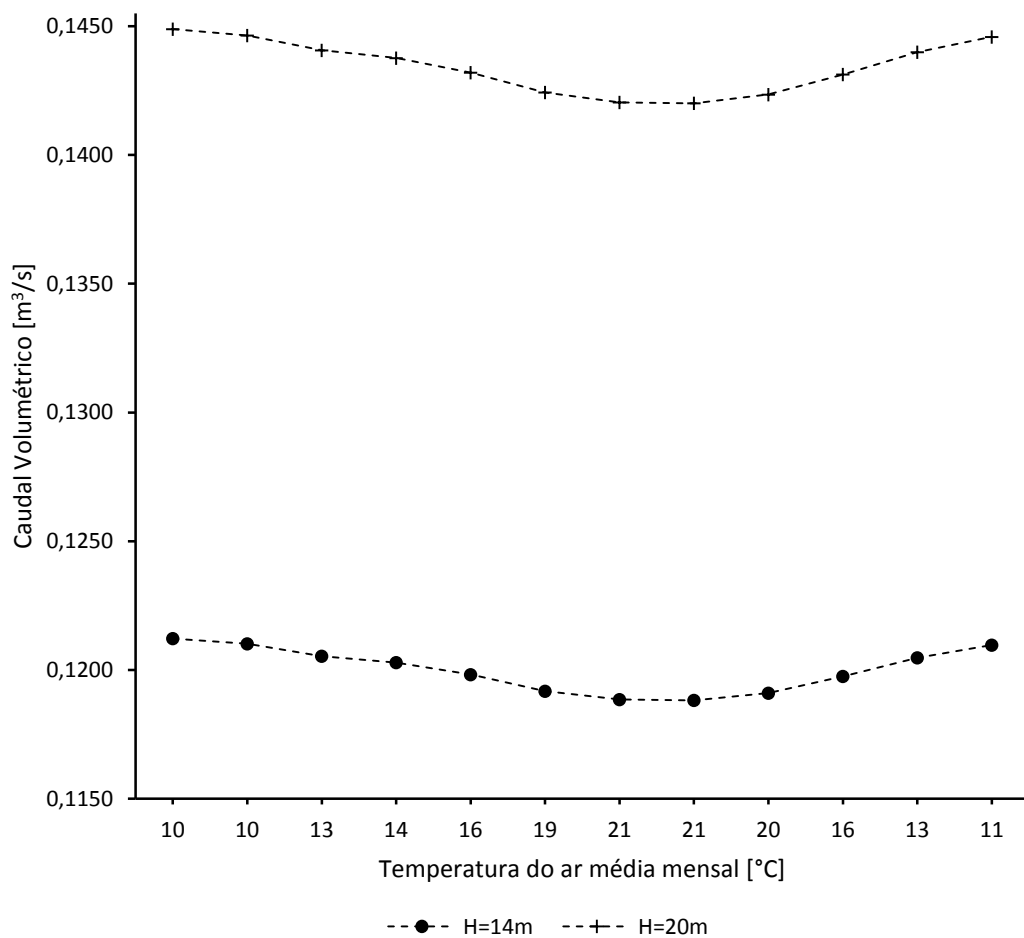
A potência hidráulica máxima disponível, dada segundo (44), encontra-se apresentada na Figura 24.

$$P_{hidráulica} = \frac{1}{2} \dot{m}_{ar} v_{ar}^2 \quad (45)$$



**Figura 24 Potências hidráulicas em função da temperatura média mensal para chaminés de diferentes alturas.**

Como já foi visto, os meses que registam maiores temperaturas do ar e irradiações, são também os meses em que conseguem as maiores potências absorvidas (ver Figura 23). Seria, portanto, de esperar que estes fossem também os meses onde ocorressem as mais elevadas potências hidráulicas. Acontece, porém, que os caudais volúnicos variam inversamente a estas variáveis, atingindo o mínimo quando a potência absorvida é máxima (ver Figura 25).



**Figura 25 Caudal volumétrico gerado em função da temperatura média mensal e irradiação.**

Atentando à correlação (29), observa-se que o caudal depende da relação entre a temperatura média,  $T_m$ , e a temperatura do ar exterior,  $T_a$  segundo  $(T_m - T_a / T_m)$ . O aumento de  $T_m$  não acompanha o aumento de  $T_a$  resultando num decréscimo da parcela desta parcela. O mesmo é dizer que  $T_a$  aumenta mais do que  $T_m$  causando, por isso, um decréscimo no caudal gerado.

Em ambos os casos se conclui que a variação entre potências hidráulicas máxima e mínima é de aproximadamente 10%. A chaminé mais alta gera, em média, uma potência hidráulica 70% maior que a da chaminé mais baixa.

Uma vez mais a chaminé de maiores dimensões foi a responsável pelo desenvolvimento do maior caudal.

# Capítulo IV

## 4.1 Conclusão

Como foi visto no capítulo 1.2, a velocidade mínima passível de aproveitamento para uma turbina de pequenas dimensões não deve ser menor que 3m/s. Ora, calculando velocidades a partir dos caudais presentes na Figura 25 (diâmetro da conduta 0,1m) , obtém-se uma velocidade média de 15,3m/s e 18,3m/s para as chaminés de 14m e 20m respetivamente. Estas velocidades sugerem ser passíveis de aproveitamento. A potência gerada, contudo, fica um pouco aquém já que, sem contar com perdas de transformação, se estima atingir um pico de 31W.

Na Tabela 19 encontram-se três modelos de turbinas atualmente comercializados por diferentes marcas. As similitudes são evidentes nomeadamente nas dimensões, velocidades de vento necessárias e tipo de gerador. Também os preços, que geralmente só se encontram disponíveis por pedido, se revelaram invariavelmente abaixo do milhar de euros. As turbinas mais baratas situam-se nos 300€ enquanto que as mais caras atingem os 700€.

Tabela 18 Comparação de especificações de vários modelos de turbinas

Modelo	ECO-300W	Aeolos-H 500w	HAWT FD2.5-500W
<b>Diâmetro do rotor [m]</b>	2,2	2,7	2,5
<b>Material e número de pás</b>	Fibra de vidro reforçado*3	Fibra de vidro*3	Resina de poliéster reforçada com fibra de vidro*3
<b>Potência nominal [W]</b>	300	500	500
<b>Velocidade de vento nominal [m/s]</b>	8	12	10
<b>Velocidade de vento de arranque [m/s]</b>	2,5	2,5	2,5
<b>Velocidade de vento máxima [m/s]</b>	50	45	40
<b>Velocidade de rotação nominal [r/min]</b>	450	N/A	N/A
<b>Voltagem</b>	DC12V/24V	24V	12-48V
<b>Tupo de gerador</b>	Trifásico de íman permanente	Trifásico de íman permanente	Trifásico de íman permanente
<b>Método de carregamento</b>	Carregamento de voltagem e corrente constante	N/A	N/A
<b>Método de regulação de velocidade</b>	Desvio do ângulo de ataque	N/A	Travão eletromagnético + Desvio do ângulo de ataque
<b>Método de paragem</b>	Automático	N/A	Travão eletromagnético
<b>Peso</b>	40kg		45kg
<b>Capacidade da bateria</b>	12V/100HA Deep cycle battery 2pcs	N/A	N/A
<b>Tempo de vida útil [anos]</b>	15	20	N/A

## 4.2 Melhorias sugeridas e estudos futuros

Melhorias sugeridas ao sistema seriam, por exemplo, o aumento da altura ou diâmetro da chaminé. Assumindo uma temperatura média anual de 15,2°C e, de acordo com a Tabela 17, uma irradiação média de 53W/m<sup>2</sup>, estima-se que o aumento do diâmetro por um fator de 2, aumente o caudal por um fator de 4 numa chaminé de 20m, e por 3,5 numa chaminé de 40m.

**Tabela 19** Variação de caudal de velocidade em função da duplicação de altura e diâmetro

<b>Caudal[m<sup>3</sup>/s]</b>		<b>Diâmetro [m]</b>	
		0,1	0,2
<b>Altura [m]</b>	20	0,143	0,574
	40	0,203	0,812

<b>Velocidade [m/s]</b>		<b>Diâmetro [m]</b>	
		0,1	0,2
<b>Altura [m]</b>	20	18,265	18,267
	40	25,830	25,832

Também a adoção de métodos que permitam elevar a temperatura no interior da chaminé - por exemplo a introdução de uma asa horizontal de plástico transparente acoplada à base da chaminé que induza uma espécie de "efeito de estufa" no ar - beneficiariam o desempenho do sistema.

Naturalmente, a irradiação, fator responsável pela disparidade entre os resultados obtidos no capítulo II e III, merece especial menção. Por muito eficiente que seja a relação entre diâmetro e altura, material da chaminé ou até mesmo a temperatura que consiga gerar no interior desta, a premissa base do sistema será sempre a irradiação incidente na face externa da chaminé. Por este motivo a instalação da chaminé num local climatericamente favorável permanece a pedra basilar em torno da qual qualquer sistema deste tipo sucede.

## *Referências Documentais*

- [1] DUFFIE, J., BECKMAN, W. — *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 1991.
- [2] McADAMS, W.H. — *Heat Transmission*. Third edition, McGraw-Hill, 1954.
- [3] TURNS, S.R. — *An Introduction to Combustion*. McGraw-Hill, 1996.
- [4] McQUILLAN, F.J., CULHAM, J.R., YOVANOVICH, M.M. — *PROPERTIES OF DRY AIR AT ONE ATMOSPHERE*, University of Waterloo, 1984
- [5] Omniflow, Lda, <http://omniflow.pt/pt/>





## Anexo A. Resultados Capítulo II

<b>H=</b>	14	m	<b>D=</b>	0,1	m	<b>I=</b>	170	W/m <sup>2</sup>
-----------	----	---	-----------	-----	---	-----------	-----	------------------

T <sub>ar</sub>	°C	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7
T <sub>s</sub>	K	286,3865	287,3026	289,5425	290,6628	292,9042	296,0643	297,6963	297,9004	296,5743	293,4137	289,9498	287,608
T <sub>pe</sub>	K	286,94	287,86	290,09	291,21	293,45	296,61	298,24	298,44	297,11	293,96	290,50	288,16
T <sub>pi</sub>	K	286,94	287,86	290,09	291,21	293,45	296,61	298,23	298,44	297,11	293,96	290,50	288,16
Caudal volúmico	m <sup>3</sup> /s	0,1211	0,1209	0,1204	0,1202	0,1197	0,1191	0,1188	0,1187	0,1190	0,1196	0,1203	0,1208
Q <sub>absorvido</sub>	W	564,54	564,28	563,74	563,52	563,17	562,93	562,93	562,93	562,92	563,11	563,66	564,20
αIA	W	717,79	717,79	717,79	717,79	717,79	717,79	717,79	717,79	717,79	717,79	717,79	717,79
Q <sub>radiação</sub>	W	52,18	52,09	51,78	51,57	51,03	49,97	49,27	49,18	49,76	50,88	51,71	52,06
Q <sub>convecção</sub>	W	101,07	101,41	102,27	102,70	103,59	104,89	105,59	105,68	105,11	103,80	102,43	101,53

<b>H</b>	14	m	<b>D</b>	0,1	m	<b>I</b>	200	W/m <sup>2</sup>
----------	----	---	----------	-----	---	----------	-----	------------------

T <sub>ar</sub>	°C	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7
T <sub>s</sub>	K	287,0929	288,0117	290,2585	291,3823	293,6305	296,8003	298,4373	298,6419	297,3118	294,1416	290,6671	288,3181
T <sub>pe</sub>	K	287,75	288,67	290,91	292,04	294,28	297,44	299,08	299,28	297,95	294,79	291,32	288,98
T <sub>pi</sub>	K	287,75	288,67	290,91	292,03	294,28	297,44	299,08	299,28	297,95	294,79	291,32	288,98
Caudal volúmico	m <sup>3</sup> /s	0,1210	0,1208	0,1204	0,1201	0,1197	0,1190	0,1187	0,1187	0,1189	0,1196	0,1203	0,1208
Q <sub>absorvido</sub>	W	670,24	669,90	669,15	668,83	668,28	667,75	667,60	667,58	667,69	668,17	669,03	669,79

$\alpha I A$	W	844,46	844,46	844,46	844,46	844,46	844,46	844,46	844,46	844,46	844,46	844,46	844,46
$Q_{\text{radiação}}$	W	54,06	54,00	53,75	53,57	53,09	52,12	51,47	51,38	51,92	52,95	53,69	53,98
$Q_{\text{convecção}}$	W	120,16	120,56	121,56	122,06	123,10	124,60	125,39	125,50	124,84	123,33	121,74	120,69

<b>H</b>	14	m	<b>D</b>	0,1	m	<b>I</b>	220	W/m <sup>2</sup>
----------	----	---	----------	-----	---	----------	-----	------------------

$T_{\text{ar}}$	°C	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7
$T_s$	K	287,5648	288,4855	290,7369	291,8629	294,1157	297,2919	298,9322	299,1373	297,8044	294,6278	291,1463	288,7925
$T_{\text{pe}}$	K	288,30	289,21	291,46	292,58	294,83	298,00	299,64	299,84	298,51	295,34	291,87	289,52
$T_{\text{pi}}$	K	288,29	289,21	291,46	292,58	294,83	298,00	299,64	299,84	298,51	295,34	291,87	289,52
Caudal volúmico	m <sup>3</sup> /s	0,1210	0,1208	0,1203	0,1201	0,1197	0,1190	0,1187	0,1187	0,1189	0,1195	0,1203	0,1207
$Q_{\text{absorvido}}$	W	740,67	740,27	739,39	739,00	738,32	737,59	737,34	737,32	737,51	738,18	739,25	740,15
$\alpha I A$	W	928,91	928,91	928,91	928,91	928,91	928,91	928,91	928,91	928,91	928,91	928,91	928,91
$Q_{\text{radiação}}$	W	55,33	55,29	55,08	54,91	54,47	53,56	52,95	52,86	53,38	54,35	55,02	55,27
$Q_{\text{convecção}}$	W	132,91	133,35	134,44	134,99	136,12	137,75	138,62	138,73	138,02	136,38	134,64	133,49

<b>H</b>	20	m	<b>D</b>	0,1	m	<b>I</b>	170	W/m <sup>2</sup>
----------	----	---	----------	-----	---	----------	-----	------------------

T <sub>ar</sub>	°C	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7
		287,146	288,065	290,313	291,438	293,687	296,860	298,498	298,703	297,372	294,199	290,722	288,372
T <sub>s</sub>	K	5	8	8	2	9	2	7	5	1	4	6	3
T <sub>pe</sub>	K	287,01	287,93	290,17	291,29	293,53	296,69	298,32	298,52	297,20	294,04	290,58	288,24
T <sub>pi</sub>	K	287,01	287,93	290,17	291,29	293,53	296,69	298,32	298,52	297,19	294,04	290,57	288,23
Caudal volumico	m <sup>3</sup> /s	0,1446	0,1444	0,1439	0,1436	0,1430	0,1423	0,1419	0,1418	0,1422	0,1429	0,1438	0,1443
Q <sub>absorvido</sub>	W	810,67	810,29	809,50	809,17	808,66	808,30	808,28	808,29	808,28	808,58	809,38	810,18
αIA	W	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42	1025,42
Q <sub>radiação</sub>	W	74,78	74,66	74,23	73,93	73,17	71,67	70,69	70,56	71,38	72,96	74,13	74,61
Q <sub>convecção</sub>	W	139,97	140,46	141,69	142,31	143,59	145,45	146,44	146,57	145,76	143,88	141,91	140,63

<b>H</b>	20	m	<b>D</b>	0,1	m	<b>I</b>	200	W/m <sup>2</sup>
----------	----	---	----------	-----	---	----------	-----	------------------

T <sub>ar</sub>	°C	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7
			288,920	291,176	292,305	294,563	297,747	299,391	299,597	298,261	295,076	291,587	289,228
T <sub>s</sub>	K	287,998	7	9	4	4	3	7	3	1	7	2	3
T <sub>pe</sub>	K	287,84	288,76	291,00	292,13	294,37	297,54	299,17	299,38	298,05	294,88	291,41	289,06
T <sub>pi</sub>	K	287,84	288,76	291,00	292,12	294,37	297,54	299,17	299,38	298,05	294,88	291,41	289,06
Caudal volumico	m <sup>3</sup> /s	0,1446	0,1444	0,1438	0,1435	0,1430	0,1422	0,1418	0,1418	0,1421	0,1429	0,1437	0,1443
Q <sub>absorvido</sub>	W	962,41	961,91	960,82	960,35	959,54	958,76	958,52	958,50	958,67	959,39	960,65	961,75
αIA	W	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37	1206,37
Q <sub>radiação</sub>	W	77,52	77,44	77,10	76,85	76,17	74,80	73,90	73,77	74,54	75,98	77,01	77,41
Q <sub>convecção</sub>	W	166,45	167,02	168,45	169,18	170,66	172,81	173,95	174,10	173,17	171,00	168,72	167,22

<b>H</b>	20	m	<b>D</b>	0,1	m	<b>I</b>	220	W/m <sup>2</sup>
----------	----	---	----------	-----	---	----------	-----	------------------

T <sub>ar</sub>	°C	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7
		288,567		291,753		295,148	298,340	299,988	300,194	298,855	295,663	292,165	289,800
T <sub>s</sub>	K	1	289,492	7	292,885	5	1	5	6	2	1	1	4
T <sub>pe</sub>	K	288,39	289,31	291,56	292,69	294,94	298,11	299,75	299,95	298,62	295,45	291,97	289,62
T <sub>pi</sub>	K	288,39	289,31	291,56	292,68	294,94	298,11	299,75	299,95	298,62	295,45	291,97	289,62
Caudal volúmico	m <sup>3</sup> /s	0,1446	0,1443	0,1438	0,1435	0,1430	0,1422	0,1418	0,1418	0,1421	0,1428	0,1437	0,1442
Q <sub>absorvido</sub>	W	1063,51	1062,93	1061,65	1061,07	1060,07	1059,01	1058,63	1058,59	1058,87	1059,87	1061,43	1062,75
αIA	W	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01	1327,01
Q <sub>radiação</sub>	W	79,37	79,31	79,03	78,80	78,19	76,91	76,05	75,93	76,66	78,02	78,95	79,28
Q <sub>convecção</sub>	W	184,14	184,77	186,34	187,13	188,75	191,09	192,33	192,49	191,48	189,12	186,62	184,98

## Anexo B. Resultados Capítulo III

<b>H=</b>	<b>14</b>	<b>m</b>	<b>D=</b>	<b>0,1</b>	<b>m</b>
-----------	-----------	----------	-----------	------------	----------

T <sub>ar</sub>	°C	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7	
I <sub>FINAL</sub>	W/m <sup>2</sup>	28,68	38,39	49,78	64,16	73,53	78,84	77,59	68,45	55,41	42,39	31,46	27,01	
T <sub>s</sub>	K	283,08	284,21	286,69	288,13	290,58	293,83	295,42	295,33	295,40	293,77	290,33	286,66	284,24
T <sub>pe</sub>	K	283,15	284,31	286,83	288,33	290,80	294,07	295,66	295,60	293,93	290,45	286,73	284,31	
T <sub>pi</sub>	K	283,15	284,31	286,83	288,33	290,80	294,07	295,65	295,60	293,93	290,45	286,73	284,31	
Caudal volumico	m <sup>3</sup> /s	0,1212	0,1210	0,1205	0,1203	0,1198	0,1192	0,1189	0,1188	0,1191	0,1198	0,1205	0,1210	
Q <sub>absorvido</sub>	W	65,81	100,22	140,68	191,49	224,75	244,03	240,10	208,22	162,13	115,52	76,24	60,10	
αIA	W	121,08	162,08	210,17	270,91	310,46	332,88	327,60	289,03	233,95	178,99	132,85	114,04	
Q <sub>radiação</sub>	W	43,56	43,95	44,10	44,69	44,55	43,57	42,65	41,90	41,70	42,30	42,84	43,20	
Q <sub>convecção</sub>	W	11,71	17,90	25,38	34,73	41,16	45,28	44,85	38,91	30,12	21,17	13,77	10,75	

<b>H</b>	<b>20</b>	<b>m</b>	<b>D</b>	<b>0,1</b>	<b>m</b>
----------	-----------	----------	----------	------------	----------

T <sub>ar</sub>	°C	9,5	10,4	12,6	13,7	15,9	19	20,6	20,8	19,5	16,4	13	10,7
I <sub>FINAL</sub>	W/m <sup>2</sup>	28,68	38,39	49,78	64,16	73,53	78,84	77,59	68,45	55,41	42,39	31,46	27,01
T <sub>s</sub>	K	283,17	284,35	286,88	288,40	290,89	294,18	295,76	295,70	294,00	290,50	286,76	284,33
T <sub>pe</sub>	K	283,15	284,32	286,85	288,35	290,83	294,11	295,69	295,63	293,95	290,46	286,74	284,31

Tpi	K	283,15	284,32	286,85	288,35	290,83	294,11	295,69	295,63	293,95	290,46	286,74	284,31
Caudal volúmico	m <sup>3</sup> /s	0,1449	0,1446	0,1441	0,1438	0,1432	0,1424	0,1420	0,1420	0,1423	0,1431	0,1440	0,1446
Q <sub>absorvido</sub>	W	94,53	143,94	202,05	275,01	322,77	350,44	344,80	299,03	232,83	165,91	109,51	86,32
αIA	W	172,98	231,54	300,24	387,02	443,51	475,55	468,01	412,90	334,21	255,70	189,79	162,91
Q <sub>radiação</sub>	W	62,26	62,83	63,06	63,92	63,74	62,37	61,05	59,96	59,65	60,48	61,23	61,73
Q <sub>convecção</sub>	W	16,19	24,77	35,13	48,08	57,00	62,74	62,15	53,92	41,72	29,31	19,05	14,86

## Anexo C. Propriedades do ar a 1atm

**Table C.1** Selected properties of air at 1 atm<sup>a</sup>

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg-K)	$\mu \cdot 10^7$ (N-s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1,000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1,100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1,200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1,300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1,400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1,500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1,600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688



## Anexo D. Temperaturas médias mensais para Braga, Porto e Beja

	T ar - Temperatura média do ar [°C]		
	Braga	Porto	Beja
<b>Janeiro</b>	9,0	9,5	9,7
<b>Fevereiro</b>	9,9	10,4	10,8
<b>Março</b>	12,3	12,6	13,4
<b>Abril</b>	13,2	13,7	14,6
<b>Maio</b>	15,8	15,9	17,7
<b>Junho</b>	19,5	19,0	22,0
<b>Julho</b>	21,4	20,6	24,6
<b>Agosto</b>	21,4	20,8	24,8
<b>Setembro</b>	19,4	19,5	22,4
<b>Outubro</b>	15,9	16,4	18,2
<b>Novembro</b>	12,3	13,0	13,6
<b>Dezembro</b>	10,2	10,7	10,7